



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

## **Bølgekraft : forslag til forsøg og rapportering**

*forslag til systematik i forbindelse med afprøvning af bølgeanlæg*

Kofoed, Jens Peter

*Publication date:*  
1999

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*

Kofoed, J. P. (1999). *Bølgekraft : forslag til forsøg og rapportering: forslag til systematik i forbindelse med afprøvning af bølgeanlæg*. Bølgekraftudvalgets Sekretariat.

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

.....

Bølgekraftudvalgets Sekretariat  
RAMBØLL  
Teknikerbyen 31  
2830 Virum  
Telefon 45 988441

## Bølgekraftudvalgets Sekretariat

# Bølgekraft - forslag til forsøg og rapportering



*Forslag til systematik i forbindelse  
med afprøvninger af bølgekraftanlæg*



<b>FORMÅL OG INDHOLD.....</b>	<b>4</b>
SAMMENDRAG .....	4
<b>1. MODELFORSG.....</b>	<b>5</b>
MODELLOVE .....	5
Skalaforhold.....	6
Omsætning mellem model og fuld skala.....	6
<b>2. HAVBØLGER OG BØLGEKRAFT .....</b>	<b>7</b>
HAVBØLGER I DEN DANSKE DEL AF NORDSØEN .....	7
KORTTIDSFORDELINGEN AF BØLGEHØJDER .....	7
Middelbølgeperioden $T_z$ .....	9
BØLGEENERGIENS FORDELING I EN SØTILSTAND (SPEKTRETS FORM).....	9
Modellering af havoverfladen.....	10
PM-spektrum.....	10
JONSWAP-spektrum .....	11
RETNINGSPREDNING, KORTKAMMEDE 3D BØLGER .....	12
SAMMENHÆNGE UD FRA SPEKTRETS MOMENTER.....	12
Den signifikante bølgehøjde $H_s$ .....	13
Middelperioden $T_z$ .....	13
Peak perioden $T_p$ .....	13
Effekt pr. meter bølgefront (Bølgeenergifluxen) .....	13
LANGTIDSFORDELING AF SØTILSTANDE (SKATTERDIAGRAM).....	15
<b>3. BØLGEFORSØG TIL AFPRØVNING AF BØLGEENERGIKONCEPTER.....</b>	<b>16</b>
INTRODUKTION .....	16
ENERGIPRODUKTION .....	16
RETNINGSPREDNING .....	17
FORSLAG TIL MINIMUMLISTEN AF STANDARDFORSØG .....	18
OVERLEVELSESFORSØG .....	18
Serie 1: Basisforsøg i langkammede bølger (PM Spektrum) .....	20
Serie 2: Spektralformulering (JONSWAP).....	20
Serie 3: Periodevariation (PM Spektrum) .....	20
Serie 4: Basisforsøg, kortkammede bølger (3D PM-spektrum) .....	21
Serie 5: Spredningsparameter variation, (3D PM- spektrum).....	21
Forsøgsvarighed .....	21
Havstrøm.....	22
DESIGNSITUATIONEN (OVERLEVELSE).....	22
Havstrøm i overlevelsessituationen.....	24
Udmattelsespåvirkning .....	24
KRAV TIL NØJAGTIGHED OG DOKUMENTATION.....	25
<b>4. BØLGEMASKINENS EFFEKTYDELSE.....</b>	<b>26</b>
ABSORBERET EFFEKT .....	26
BØLGEMASKINERS ÅRLIGE ENERGIPRODUKTION .....	27
Årlig middeleffekt.....	27
Middelindfangningseffektiviteten .....	27
<b>5. METODER TIL EFFEKTMÅLING AF BØLGEENERGIANLÆG .....</b>	<b>28</b>
INTRODUKTION .....	28
TRYK- OG FLOWMÅLING .....	28
MOMENT- OG VINKELHASTIGHEDSMÅLING .....	30
KRAFT- OG HASTIGHEDSMÅLING.....	30

MÅLEMETODER VED FORSKELLIGE KONCEPTER .....	31
BESTEMMELSE AF EFFEKTPRODUKTION .....	31
<b>6. EFFEKTBESTEMMELSE FOR UDVALGTE KONCEPTER .....</b>	<b>33</b>
SVINGENDE VANDSØJLER ( OWC ) .....	33
POINT ABSORBERE .....	34
<i>Kim Nielsens point absorber</i> .....	34
<i>Odin</i> .....	35
<i>Poseidons organ</i> .....	36
OPSKYLNINGSANLÆG .....	37
<i>Wave Dragon</i> .....	37
<i>Bølgehøvl</i> .....	38
BØLGEMØLLER .....	39
<i>T. Basses bølgemølle</i> .....	39
<b>7. INSTRUMENTERING AF ENERGIPRODUKTIONSMÅLINGER .....</b>	<b>40</b>
INTRODUKTION .....	40
EFFEKTBESTEMMELSE AF VÆSKE I EN RØRSTRØMNING .....	40
<i>Tryk og momentmåling</i> .....	42
<i>Blødemåling</i> .....	43
<i>Måling med pitotrør</i> .....	44
<i>Turbine flowmeter</i> .....	45
<i>Dynamo</i> .....	45
<i>Ultralyd doppler flowmeter</i> .....	46
<i>Elektromagnetisk flowmåling</i> .....	46
<i>Vortex-flowmeter</i> .....	47
<i>Fyldning af kar eller ballon</i> .....	47
<i>Rotameter</i> .....	48
LUFTSTRØMNINGER .....	48
BESTEMMELSE AF DEN MEKANISKE EFFEKT SOM PÅFØRES ET STEMPEL .....	48
MOMENT OG OMLØBSTAL .....	49
EKSPERIMENTEL BESTEMMELSE AF OPTIMAL ENERGIABSORPTION .....	50
<b>8. RAPPORTERING AF FORSØG .....</b>	<b>51</b>
INDLEDNING .....	51
BØLGEMASKINEN, PRINCIP OG TEGNING .....	51
FORMÅL OG BAGGRUND .....	52
KONKLUSION OG SAMMENDRAG .....	52
VALG AF FREMGANGSMÅDE OG METODIK .....	53
RESULTATER OG KONKLUSIONER .....	53
ØKONOMISK OVERSIGT .....	53
FORSLAG TIL FORTSAT ARBEJDE .....	53
<b>APPENDIKS A. BEREKNING AF ENERGIPRODUKTION .....</b>	<b>55</b>
<i>Referencefordelingen af søtilstande H<sub>s</sub></i> .....	55
<i>Middel bølgekraftpotentiale</i> .....	55
DATA FOR EN BØLGEMASKINE .....	56
<i>Bølgekraftmaskinens udstrækning</i> .....	56
<i>Årlig middel rådighedseffekt for en bølgekraftmaskine</i> .....	56
<i>Absorberet effekt (årlig middel)</i> .....	56
<i>Indfangningseffektivitet, <math>\eta_1</math></i> .....	57
<i>Mekanisk virkningsgrad, <math>\eta_2</math></i> .....	57
<i>Virkningsgrad for turbine og generator, <math>\eta_3</math></i> .....	57
<i>Årligt produceret energi</i> .....	58

DATA FOR ET STORT KRAFTVÆRK .....	58
<i>Antal bølgemaskiner .....</i>	58
<i>Anlagt strækning og middelfastand.....</i>	58
<i>Årlig rådighedsenergi .....</i>	59
<i>Retningsfaktor for bølgemaskiner i klynger.....</i>	59
<i>Transmissionsvirkningsgrad, <math>\eta_4</math>.....</i>	60
<i>Rådighedsfaktor .....</i>	60
<i>Årligt produceret energi .....</i>	60
<b>APPENDIKS B. OVERLEVELSES OG DESIGNFORHOLD.....</b>	<b>61</b>
<i>Placering i Nordsøen .....</i>	61
<i>Vanddybde og vandstandsvariationer.....</i>	61
<i>Overlevelsesorsøg / designbølger .....</i>	61
<i>Konstruktionsdata for bølgemaskinens elementer .....</i>	61
<i>Forankringssystem.....</i>	61
<i>Udmattelse og levetidsberegninger.....</i>	62
<i>Resultater af forsøg.....</i>	62
<i>Konklusioner.....</i>	62
<b>LITTERATUR LISTE.....</b>	<b>63</b>

# Formål og indhold

## Sammendrag

Denne rapport er udarbejdet for at skabe en systematisk oversigt over de forsøg, der udføres på bølgekraftmaskiner for at bestemme energiproduktion, kritiske belastninger og overlevelsessevne.

Rapporten gennemgår modellove, der gør det muligt at omsætte målinger i modelskala til fuld. Desuden gives et eksempel på, hvorledes bølgekraftmaskinens årlige middelenenergiproduktion kan beregnes.

Havets bølger og de dertil svarende karakteristiske parametre beskrives.

På basis af de bølgeforhold, som optræder i den danske del af Nordsøen, er der udarbejdet et forslag til et minimumsprogram for søtilstande til afprøvning af bølgemaskiner. Forsøgene skal belyse de belastninger, som anlægget udsættes for, og set i relation til overlevelsessevne. Desuden måles bølgekraftmaskinens energiproduktion.

Eksempler på måling af kendte (Januar 1999) bølgemaskiners energiproduktion gennemgås, og de forhold, som eksperimentelt kan fastlægges, beskrives.

Eksempler på instrumentering til de relevante målinger i forbindelse med bølgeenergiforsøg gennemgås.

Endelig beskrives, hvorledes resultaterne kan rapporteres, således at resultater opnået med forskellige anlægstyper kan sammenlignes.

Rapporten er udarbejdet af et fagligt underudvalg under Energistyrelsens Rådgivende Bølgekraftudvalg bestående af Hans F. Burcharth (Aalborg Universitet), Vagner Jacobsen (Dansk Hydraulisk Institut), Michael Macdonald Arnskov (Dansk Maritimt Institut), og Kim Nielsen (RAMBØLL). Desuden har Carl Erik Vad Bennetzen (Odense Teknikum) ydet redaktionelle bidrag. Hovedrapportens enkelte afsnit har været fordelt som angivet nedenfor:

- Bølgeforhold (DHI)
- Målemetoder (AAU)
- Instrumentering (DMI)
- Koordinering og redigering (RAMBØLL)

# 1. Modelforsøg

Modelforsøg udføres inden en given konstruktion bygges i fuld størrelse for at få oplysninger om, hvordan den vil opføre sig i havet. Modelforsøg, udført systematisk, bruges også til at etablere lovmæssigheder, der gælder for et større udvalg af principielt ens konstruktioner.

Man har, specielt inden for skibs- og havteknik, en tradition for udførelse af modelforsøg, som kan tilvejebringe oplysninger om kræfter og bevægelser, som skal benyttes i forbindelse med fastlæggelse af det endelige design.

For skibe kan det være forhold som stabilitet (sikkerhed mod kæntring med og uden lækage, med eller uden frie overflader), sødygtighed, skrogmodstand der skal overvindes af maskinen, tilstrømning til skibspropellen, propellerens størrelse, vibrationsforhold m.m., mens der for havne kan være tale om molernes form, bølgeforhold i havnebassinet, stabilitet af moler, sedimentation mm. For offshore boreplatforme, faste eller flydende, kan der være tale om at undersøge forankringssystemer (antal ankre, tovlængder, orienteringsvinkler), design-belastninger for forankringssystem og stabilitet af funderingsforhold.

For bølgeenergimaskiner vil nogle, måske endda mange af disse forhold, være relevante.

Anlæg til udnyttelse af bølgeenergi er ligesom skibe og havne store anlæg, som ved modelforsøg inden bygning i stor skala kan optimeres med hensyn til designbelastninger og energiproduktion. På basis af forsøgene vil det være muligt at vurdere omkostningerne forbundet med bygning af anlægget og indtægterne i form af produceret energi. Bemærk, at den producerede energi (Joule, kWh) over f.eks. ét år ikke må forveksles med den øjeblikkelige effektydelse (kW, J/s) eller middel effektydelse pr. år.

## Modellove

Den mest anvendelige modellov i forbindelse med bølgeenergi er Froudes modellov [1], som gælder, når følgende betingelser er opfyldt:

- Inertikræfter dvs. kræfter proportionale med konstruktionens masse (men ikke med f.eks. dens overfladeareal) dominerer i forhold til andre kræfter.
- Friktionskræfter kan negligeres; dvs. at bølger i bevægelse ikke kan flytte en konstruktion ved "gnidning".
- Modellen skal være geometrisk ligedannet med fuld-skala konstruktion; dvs. at tegningen af modellen i princippet kan bruges til fuld-skala konstruktionen, blot man retter målestoksforholdet.



## Skalaforhold

Modelforsøg udføres i et skalaforhold, som bl.a. afhænger af det modelbassin, man påtænker at udføre forsøg i, og af hvad man er interesseret i at undersøge. Det, som i første omgang skaleres, er bølgeforholdene, dvs. At hvis der i naturen er observeret en bølge med en højde på 20 meter og en periode på 10 sekunder, så kan man i princippet vælge at benytte skalaforholdet 1:100 og genskabe en modelbølge, som er 20 cm høj med en periode på 1 sek. Hvis vanddybden er 50 meter, skal vanddybden i bassinet være 50 cm.

*Froudes modellov betyder, at alle dimensioner skaleres direkte proportionalt med skalaforholdet, mens tiden skaleres med kvadratroden på skalaforholdet.*

På basis af forsøg kan de målte kræfter og strømninger omregnes til fuld skala. Typiske størrelser, som skal omregnes, er vist i nedenstående Tabel 1.1.

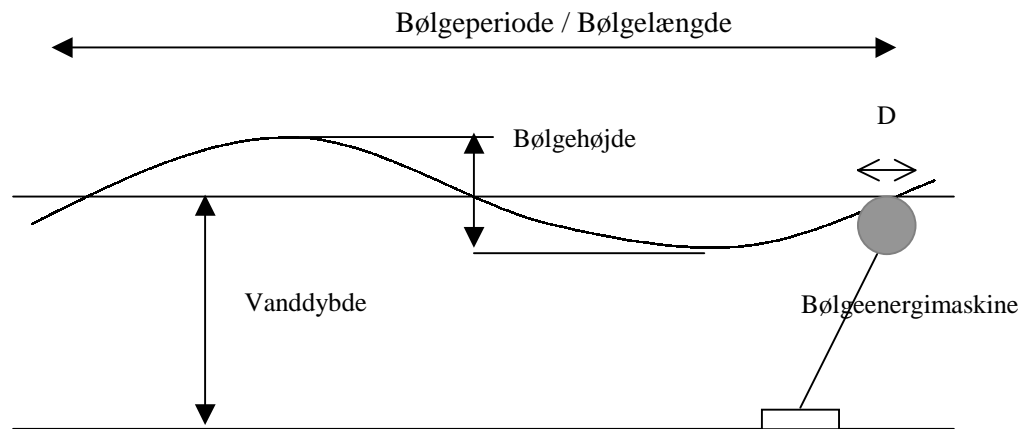


Fig. 1.1 Definitionsskitse af typiske længder der skal bevare samme indbyrdes forhold i model og fuld størrelse.

## Omsætning mellem model og fuld skala

Når der er udført forsøg i modelskala, omregnes de målte værdier til værdier, som vil gælde i fuld skala. Typiske parametre, som man ønsker at omregne, er vist i Tabel 1.1.

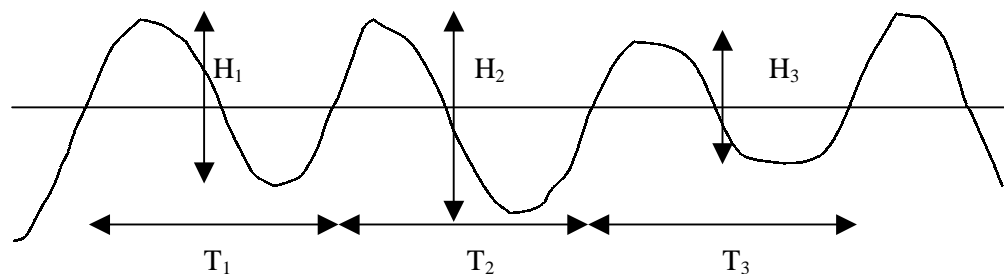
Parameter	Model	Fuld skala
Længde	1	S
Areal	1	$s^2$
Volumen/Masse/Kraft	1	$s^3$
Tid	1	$\sqrt{s}$
Hastighed	1	$\sqrt{s}$
Effekt	1	$s^{3,5}$

## 2. Havbølger og bølgekraft

### Havbølger i den danske del af Nordsøen

Bølger på havoverfladen er fra naturens side uregelmæssige - store bølger, små bølger, korte og lange følger hinanden, overhaler hinanden og brydes. Når stormen pludselig sætter ind over et havområde, sættes havet i oprør, og bølgerne frårer, bliver større og større. Afhængig af hvor stærkt det blæser, og hvor lang en strækning vinden har haft til at skabe bølger, vokser bølgerne til en vis størrelse. Bølger breder sig i forskellige retninger og er derfor ikke uendeligt langkammede. Hvis der er stor spredning i retningerne, f.eks. i et havområde, hvor et lavtryk passerer, og vinden ændrer retning undervejs, kan bølgerne være meget kortkammede, i modsætning til dønninger, hvor bølgekammen kan være flere hundrede meter lang.

Bølgerne vokser imidlertid ikke hurtigere, end at man med rimelighed kan tale om ensartede forhold inden for en periode mellem en til tre timer. I en sådan kort periode kan man tale om, at der er en fremherskende søtilstand, med en karakteristisk fordeling (korttidsfordeling) af bølgehøjder, og man kendetegner søtilstanden ved en signifikant bølgehøjde  $H_s$ . Den signifikante bølgehøjde er relevant for skibs- og offshorekonstruktioner, men også i forbindelse med bølgeenergimaskiner er der enighed om at beskrive den søtilstand, hvor styrkeberegninger og energiproduktionsmålinger er gældende, ved den signifikante bølgehøjde  $H_s$ .



Figur 2.1 Søtilstand  $H_s$  består af bølger af forskellig højde  $H_i$  og periode  $T_i$

### Korttidsfordelingen af bølgehøjder

Det optegnede bølgetog kan bearbejdes på to måder, enten statistisk eller analytisk. Statistisk kan man opfatte bølgeoptegnelsen som sammensat af

enkeltbølger, som hver defineres fra det tidspunkt, havoverfladen skærer op gennem middelniveau. Middelbølgehøjden  $H_m$  er defineret som gennemsnittet :

$$H_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i \quad (1)$$

hvor  $H_i$  betegner de individuelle bølgehøjder. Hvis den signifikante bølgehøjde udledes på basis af en statistisk analyse af de enkelte bølgehøjder i et bølgetog, betegnes den ofte  $H_{1/3}$ . Den signifikante bølgehøjde  $H_s = H_{1/3}$  er ca. en faktor 1.6 større end middelbølgehøjden

$$H_s = 1.6 H_m$$

Den signifikante bølgehøjde  $H_s$  er et mål for havoverfladens udsving omkring stillestands niveauet, således at forstå, at hvis man f.eks. i tyve minutter optog en måling af havoverfladens bevægelse op og ned og målte højden fra bølgedal til bølgetop af hver bølge, så kan den signifikante bølgehøjde  $H_{1/3}$  defineres som middelværdien af den største tredjedel af bølgehøjderne.

*Man kendetegner søtilstanden ved en signifikant bølgehøjde  $H_s$  og en middelbølgehøjde  $H_m$*

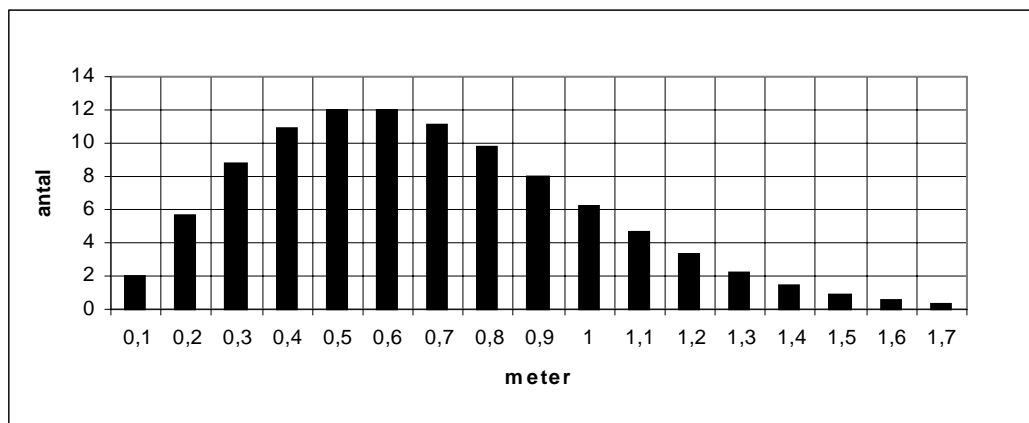
Man kan statistisk forudsige, hvor stor en del af tiden bølger i en given søtilstand vil være mindre end eller lig en vis højde  $h$ . Erfaringen viser, at en Rayleigh-sandsynlighedsfordeling med  $H_s = H_{1/3}$  som parameter giver et godt skøn. Matematisk ser fordelingsfunktionen således ud:

$$P\{H \leq h\} = 1 - \exp\left[-2\left(\frac{h}{H_s}\right)^2\right] \quad (2)$$

Den mest sandsynlige højeste bølge  $H_{\max}$  i et bølgetog på  $N$  bølger i en søtilstand med en signifikant bølgehøjde  $H_s$  kan beregnes som:

$$H_{\max} = H_s \sqrt{\frac{1}{2} \ln N} \quad (3)$$

*Eksempel:* På nedenstående Figur 2.2 er vist, hvor mange enkeltbølger, der kan forventes inden for 10 cm intervaller i området 0 til 1,7 meter i et bølgetog på 100 bølger, når den signifikant bølgehøjde  $H_s$  er én meter. Man kan se, at der er flest bølger i intervallet mellem 0,5m-0,6m og 0,6m-0,7m - ca. 12 i hver, og den største



bølge mellem 1,5 og 1,6 meter høj.

Figur 2.2 Antal bølger inden for forskellige højdeintervaller i et bølgetog på 100 bølger med  $H_s = 1m$ .

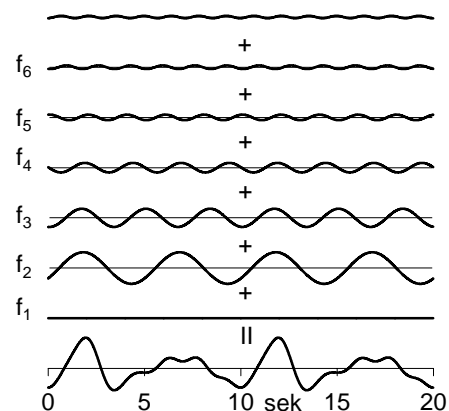
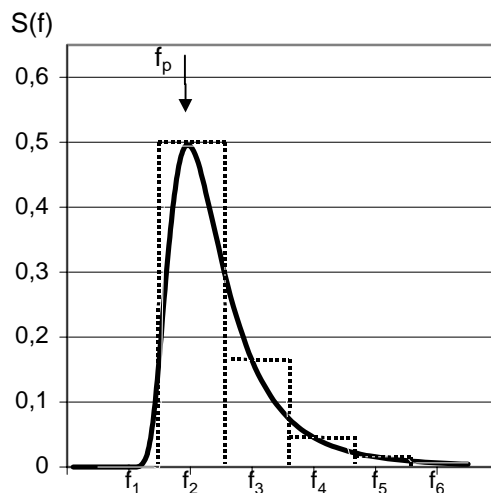
### Middelbølgeperioden $T_z$

Til søtilstanden  $H_s$  er der knyttet en middelperiode  $T_z$ .  $T_z$  kan enten måles som den tid, der i middel er mellem hver gang havoverfladen passerer op eller ned forbi stillevandsniveau. Middelbølgeperioden benævnes afhængig heraf for henholdsvis zero up eller zero down crossing. De to tidtagninger giver samme  $T_z$ .

Middelbølgeperioden kaldes  $T_z$

### Bølgeenergiens fordeling i en søtilstand (spektrets form)

Den signifikante bølgehøjde kan også beregnes ud fra en analyse af energien på de enkelte bølgefrequenser i et bølgetog og betegnes i så fald  $H_{m0}$ . I en given søtilstand  $H_s = H_{m0}$  kan havoverfladen opfattes som en overlejring af mange bølger. Herved forstås, at bølgens overflade principielt kan findes ved at lægge overfladeniveauer sammen af en mængde bølger af forskellig højde, retning og frekvens, men hver for sig af sinusformet type. De forskellige retninger bestemmer spredningen. Dette kan udtrykkes i et såkaldt bølgeenergispektrum  $S(f)$ , som fortæller, hvor megen energi der ligger på de enkelte perioder eller frekvenser. På basis af målinger af søtilstande med passende små tidsmellemlrum kan man ad matematisk vej (Fourier-analyse) bestemme tilstrækkeligt mange af disse enkelte bølger (bestemt ved højde, frekvens og retning). Et spektrum kan bestemmes f.eks. ved en Fourier-analyse af havoverfladens udsving i tiden.



Figur 2.3 Bølgespektrum viser energiens fordeling og intensitet på forskellige frekvenser.

Energien i havoverfladen er proportional med bølgehøjden i anden potens. Bølger inden for frekvensområdet  $f_1$  til  $f_2$  har en energimængde  $\Delta m_o$ , og den totale energimængde  $m_o$  fås ved at opsummere arealerne af strimlerne over alle frekvenser. Toppen af kurven (den højeste strimmel) angiver den frekvens, hvor der er mest energi, peak frekvensen  $f_p$  og peak perioden  $T_p = 1/f_p$ . Det viser sig med god tilnærmelse, at den signifikante bølgehøjde kan beregnes ud fra arealet  $m_o$  under spektret som:

$$H_s = H_{m_o} = 4\sqrt{m_o} \quad (4)$$

Den signifikante bølgehøjde udledt fra spektret er proportional med kvadratroden af arealet  $m_o$  under spektret  $H_s = H_{m_o}$

Peak perioden  $T_p = 1/f_p$  er den mest energirige periode i spektret

### Modellering af havoverfladen

Den signifikante bølgehøjde er en veletableret parameter til at karakterisere en søtilstand og dens totale energiindhold. En søtilstand indeholder en række enkeltbølger med varierende højder og perioder (og retninger). Til at beskrive energifordelingen i den enkelte søtilstand på perioder (eller frekvenser) anvendes ofte et bølgeenergispektrum. Til mange formål anvendes standardspektra, der enten er fremkommet ud fra analytiske overvejelser eller ud fra omfattende måleprogrammer. Til den første type hører det mest udbredte spektrum, det såkaldte Pierson-Moskowitz (PM) spektrum, som beskriver energifordelingen på frekvenser i en fuldt udviklet søtilstand. Til den anden type hører JONSWAP-spektret, der er fremkommet som resultatet af et intensivt måleprogram i Nordsøen (JOint North Sea Wave Analysis Program). JONSWAP-spektret indeholder flere frie parametre end PM-spektret og er mere velegnet til at beskrive opvoksende og ikke-fuldtudviklede søtilstande.

### PM-spektrum

Dette spektrum beskriver havoverfladen i den situation, der kaldes ”fuldt udviklet sø”, hvor der er opnået en balance mellem bølger og vindhastighed, og hvor havområdet er ubegrænset.

Spektret for fuldt udviklet sø er opkaldt efter de to forskere Pierson og Moskowitz (PM), som på basis af en lang række målinger i havet kom frem til følgende bølgeenergispektrum  $S(f)$ , som fortæller, hvor meget energi der ligger på de enkelte perioder eller frekvenser:

$$S(f) = \frac{A}{f^5} \exp\left(-\frac{B}{f^4}\right) \quad (5)$$

Hvor A er en konstant og B afhænger af vindstyrken U i m/s:

$$A = \frac{8,1 \cdot 10^{-3} \cdot g^2}{(2\pi)^4} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2 \text{ s}^{-4}] \quad (6)$$

$$B(U) = 74 \cdot \left(\frac{g}{2\pi U}\right)^4 = 4,39 U^{-4} \text{ [s}^{-4}] \quad (7)$$

Det matematiske udtryk, som PM-spektret er baseret på, giver også mulighed for at beskrive søtilstande, som ikke er fuldt udviklede.

De søtilstande, som i denne rapport anvendes til forsøg, specificeres med to parametre til fastlæggelse af spektrets form:

- peak perioden  $T_p$  ( $f_p = 1/T_p$ )
- den signifikante bølgehøjde  $H_s$ .

Konstanterne A og B, som indgår i spektret, kan beregnes ud fra disse to parametre som:

$$A = \frac{5 \cdot H_s^2 \cdot f_p^4}{16} \quad (8)$$

og

$$B = \frac{5 \cdot f_p^4}{4} \quad (9)$$

Når der anvendes to parametre kaldes spektret for Brechneider, men da spektret har den samme generelle form som PM-spektret, så vil dette spektrum også blive benævnt PM-spektrum i det følgende.

### JONSWAP-spektrum

For havområder, hvor der er tale om kystbegrænsninger, er der udviklet et spektrum, som kaldes JONSWAP-spektrum, hvilket står for JOint North Sea WAve Projekt (Hasselmann et al. 1973).

Spektret har i princippet samme form som PM-spektret, men er påført en faktor, som øger energien omkring peak frekvensen.

$$S(f) = 0,205 \cdot H_s^2 \cdot f_p^4 \cdot f^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \cdot \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right) \cdot 3,3^a \quad (10)$$

hvor

$$a = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{(f - f_p)}{\sigma \cdot f_p} \right)^2 \right] \quad (11)$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a = 0,07 & \text{for } f < f_p \\ \sigma_a = 0,09 & \text{for } f \geq f_p \end{cases} \quad (12)$$

### Retningsspredning, kortkammede 3D bølger

Havets bølger har ikke uendeligt lange bølgekamme. Bølger er mere eller mindre langkammede. For at udtrykke det matematisk påføres spektret en spredningsfunktion  $f(\theta)$ , som beskriver, hvor meget energi der ligger på retninger i en vinkel ( $\theta$ ) fra bølgenes hovedudbredelsesretning.

$$S(f, \theta) = S(f) * f(\theta) \quad (13)$$

En spredningsfunktion, der ofte anvendes, er givet ved følgende relation:

$$f(\theta) = \begin{cases} A \cos^{2s}(\theta) & \text{for } |\theta| < \pi/2 \\ 0 & \text{ellers} \end{cases} \quad (14)$$

således at integralet over alle retninger af  $f(\theta)$  bliver 1.

$$\int_0^{2\pi} f(\theta) d\theta = 1 \quad (15)$$

Den parameter, der anvendes til at beskrive spredningen, er  $s$ . En stor værdi af  $s$  giver den mindste spredning. :

$A$  afhænger af spredningsparameteren  $s$  og  $A$  er defineret som:

$$A = \frac{1}{\pi} \frac{2 * 4 * 6 * \dots * 2s}{1 * 3 * 5 * \dots * (2s - 1)} \quad (16)$$

Det skal bemærkes, at usikkerheden omkring retningsspektret er stor, specielt i områder nær kysten.

### Sammenhænge ud fra spektrets momenter

Hvis man har målt havoverfladens udsving med tiden, kan man bestemme energispektret og ud fra dette beregne den signifikante bølgehøjde, middelperiode, peak periode og energiflux. Dette gøres ved at beregne momenterne  $m_i$ :

$$m_i = \int f^i S(f) \partial f \quad (17)$$

Således er:

$$m_o = \int S(f) \partial f \quad (18)$$

$$m_{-1} = \int f^{-1} S(f) \partial f \quad (19)$$

$$m_2 = \int f^2 S(f) \partial f \quad (20)$$

### Den signifikante bølgehøjde $H_s$

Den signifikante bølgehøjde kan defineres ud fra spektret som:

$$H_s = 4\sqrt{m_o} \text{ [m]} \quad (21)$$

### Middelperioden $T_z$

Middelperioden  $T_z$  defineres ud fra spektrets momenter  $m_o$  og  $m_2$

$$T_z = \sqrt{\frac{m_o}{m_2}} \text{ [Sek.]} \quad (22)$$

### Peak perioden $T_p$

Peak perioden  $T_p$  angiver den største energiperiode i søtilstanden, og er ca. en faktor 1.4 større end middelperioden  $T_z$ :

$$T_p = 1.4 T_z \text{ [Sek.]} \quad (23)$$

### Effekt pr. meter bølgefront (Bølgeenergifluxen)

Effekten målt i kW/m angiver den energi, der pr. sekund passerer en fast strækning på en meter parallelt med bølgekammen. Effekten kan beregnes ud fra spektret som:

$$P_w = \frac{\rho g^2}{4\pi} m_{-1} \text{ [kW/m]} \quad (24)$$

Effekten kan udtrykkes ved den signifikante bølgehøjde  $H_s$  og middelperioden  $T_z$ .

$$P_{inf} = 0.577 H_s^2 \cdot T_z \text{ [kW/m]} \quad (25)$$

For fuldt udviklet sø, dvs. en søtilstand som fremhersker, når vinden over et tilstrækkeligt stort havområde har blæst så længe, at bølgerne ikke bliver større, så findes sammenhængen mellem  $H_s$  og  $T_z$  :

$$T_z = 3,55 \cdot \sqrt{H_s} \text{ [Sek.]} \quad (26)$$



I dette tilfælde kan man udtrykke effekten i en meter bølgefront alene ud fra den signifikante bølgehøjde  $H_s$  som:

$$P_{\text{inf}} = 2.05 \cdot H_s^{2.5} \text{ [kW/m]} \quad (27)$$

Vindstyrke	5	7,5	9	10	12	15
$H_s$ (m)	0,5	1,2	1,7	2,1	3,1	4,8
$T_z$ (s)	2,6	3,9	4,7	5,2	6,2	7,8
$P_w$ (kW/m)	0,4	3,2	8,0	13,1	33,8	103,2

*Tabel 1.2 Sammenhænge mellem vindstyrke, signifikant bølgehøjde  $H_s$ , middelperiode  $T_z$ , og effekt pr. meter bølgefront PM spektrum.*

## Langtidsfordeling af søtilstande (Skatterdiagram)

Langtidsfordeling betyder i denne forbindelse et tidsrum af størrelsesordenen konstruktionens levetid. Fordelingen af søtilstande kan anføres i et skatterdiagram, som viser, hvor mange timer eller promille af året forskellige kombinationer af  $H_s$  og  $T_z$ , der fremhæver på årsbasis.

Fordelingen af bølgeforhold i Nordsøen afhænger af den position i Nordsøen, man vælger. Det er generelt sådan, at der er mere energi pr. år på en position langt fra Jyllands vestkyst og energien stiger med stigende vanddybde. Som led i Bølgekraftprogrammet er der udarbejdet et bølgeatlas som belyser disse forhold [1]. Som eksempel er i nedenstående skatterdiagram Tabel 2.2, vist, hvor mange timer af året søtilstande med en signifikant bølgehøjde  $H_s$  inden for en meters interval og en middelperiode  $T_z$  sekunds interval forekommer. De anførte data er beregnede forhold i et punkt, der ligger på 30 meter dybt vand ud for Horns rev.

Hs	Middelbølgeperiode Tz [sek.]								Sum	Pct
	2.0-3.0	3.0-4.0	4.0-5.0	5.0-6.0	6.0-7.0	7.0-8.0	8.0-9.0	> 9.0		
8.5-9.5										
7.5-8.5										
6.5-7.5							4	2	6	0,1%
5.5-6.5						2	26		28	0,3%
4.5-5.5						103	12		115	1,3%
3.5-4.5					208	154			362	4,1%
2.5-3.5			1	296	538	3		1	839	9,6%
1.5-2.5		1	635	1211	26	3		3	1879	21,4%
0.5-1.5	20	1741	2007	275	81	26	13	11	4174	47,6%
< 0.5	584	634	113	29	7	1			1368	15,6%
Sum	604	2376	2756	1811	860	292	51	15	8771	100,0%

Tabel 2.2 Skatterdiagram hyppigheden af kombinationer mellem  $H_s$  og  $T_z$

Når hyppigheden, hvormed forskellige søtilstande forekommer, er fastlagt, kan energiproduktionen fra bølgekraftanlægget beregnes på basis af forsøg, der giver oplysninger om bølgemaskinens ydeevne i de forskellige søtilstande. For at skabe et ensartet grundlag til sammenligning mellem forskellige bølgeenergimaskiner har et fagligt udvalg under Energistyrelsen anbefalet et udsnit af søtilstande, der skal genereres i det forsøgsbassin, hvori modellen skal afprøves.

Langtidsfordelingen af  $H_s$  samlet over alle retninger, kan beskrives ved en Weibull sandsynlighedsfordeling med parametrene  $b$  og  $k$ . Når  $b$  og  $k$  er fastlagt ud fra data materialet i skatterdiagrammet, kan hyppigheden  $P_i$  af søtilstande i intervallet  $H_s \pm 0,5$  m beregnes som:

$$P_i(H_s \pm 0,5) = \exp\left(-\left(\frac{H_s - 0,5}{b}\right)^k\right) - \exp\left(-\left(\frac{H_s + 0,5}{b}\right)^k\right) \quad (28)$$

# 3. Bølgeforsøg til afprøvning af bølgeenergikoncepter

## Introduktion

Dette afsnit indeholder forslag til de nødvendige forsøg, et bølgeenergikoncept skal gennemgå i forbindelse med en vurdering af energiproduktion og dimensionsgivende last. Afsnittet er opbygget med en beskrivende del fulgt op af en oversigt over de nødvendige forsøg. I den beskrivende del er der angivelser af krav til nøjagtigheder og dokumentation af bølgeforsøgene. For de anvendte parametre og termer henvises der til forrige afsnit.

Det er i nærværende forslag forudsat, at Nordsøen er det endelige mål for koncepterne, som derfor skal afprøves under de mest realistiske forhold i relation til Nordsøen, dvs. retningsspredte (kortkammede) bølger med realistiske parametre for højde, perioder, retningsspredning mm. Imidlertid kan det forventes, at visse koncepter indledningsvis bliver afprøvet i langkammede bølger, samt at enkelte koncepter er meget lidt følsomme over for retningsspredningen. Det er derfor vigtigt, at der etableres et koncist sammenligningsgrundlag for energiproduktionen i langkammede såvel som i kortkammede bølger.

I det følgende beskrives bølgerne med de traditionelle parametre for en søtilstand: den signifikante bølgehøjde  $H_s$  og middelbølgeperioden  $T_z$ . Disse to parametre (suppleret med retningsspredningen  $s$  af bølgeenergien) beskriver bølgeforsøgene inden for en tidsperiode på mellem 1 time og 3 timer.

## Energiproduktion

Energiproduktionen må forventes at skulle kunne opretholdes i søtilstande med en signifikant bølgehøjde op til 4 m, muligvis 5 m. Søtilstande op til dette niveau vil dække mere end 90% af søtilstandene på årsbasis.

Baseret på erfaringer fra den centrale del af Nordsøen samt resultater fra projektet [3] er nedenstående sammenhænge mellem bølgehøjder og -perioder udarbejdet. Det skal bemærkes, at der for en given værdi af den signifikante bølgehøjde,  $H_s$ , forekommer en naturlig variation i bølgeperioden (middelbølgeperioden,  $T_z$ , eller den spektrale peak periode,  $T_p$ ). Nedenstående Tabel 3.1 angiver de centrale

værdier af middelbølgeperioden for en given værdi af  $H_s$ . Variationen i bølgeperioden er relativt stor for de små søtilstande. For signifikante bølgehøjder over 2 – 3 m vil et interval på  $\pm 1$  s omkring de angivne centrale værdier indeholde praktisk taget alle relevante kombinationer. For søtilstande under 2 m er variationen i perioder større.

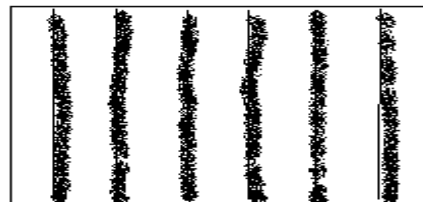
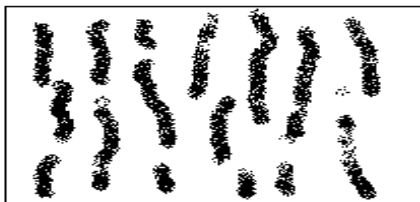
Søtilstand $H_s$ [meter]	1	2	3	4	5
Middelperiode $T_z$ [sek.]	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
Peak periode $T_p$ [sek.]	5,6	7,0	8,4	9,8	11,2
Bølgeenergiflux kW/m	2,1	11,6	32	65,6	114

Tabel 3.1 Test matrix 1, søtilstande til energiproduktion.

Det er vanskeligt at afgøre, om standardforsøg skal afvikles med PM- eller JONSWAP-spektra. Det ene spektrum vil nok være mest korrekt i tilfælde af langvarige, næsten konstante vindforhold og under henfald af ”storme”, medens det andet vil være mest korrekt under varierende vindforhold og opvoksende ”storme”. Et gennemsnitsår i Nordsøen vil indeholde en blanding af disse søtilstande. Forskellen mellem de to spektre vil tydeligst vise sig for koncepter, der opererer dynamisk med de karakteristiske bølgeperioder som drivende faktor. For sådanne koncepter kan der være en større energiproduktion fra en ”JONSWAP” søtilstand for visse perioder, hvor resonans optræder. Til gengæld kan det forventes, at produktionen her bliver lidt mindre end for en ”PM” søtilstand, når perioden er længere væk fra resonans. Der vil således for langt de fleste koncepter ikke være så signifikant forskel på energiproduktionen i PM og JONSWAP søtilstande, at dette alene vil afgøre et koncepts anvendelighed. For ikke at gøre det nødvendige minimumsforsøgsprogram mere omfattende end højst nødvendigt anbefales det, at energiproduktionen undersøges basalt for PM-spektret, medens effekten af at anvende JONSWAP-spektret undersøges som led i parameterstudiet. Dette valg er truffet under hensyn til, at de fleste eksisterende forsøgsdata er for PM-spektret.

## Retningspredning

Retningspredningen af de kortkammede bølger er p.t. ikke analyseret i så detaljeret en grad for den danske del af Nordsøen, at meget faste retningslinjer for retningsspredningen kan gives. Imidlertid er det vigtigt at få fastslået retningsspredningens betydning for energiproduktionen, så det må som minimum kræves, at der for relevante koncepter gennemføres et parameterstudie af retningsspredningens betydning.



Figur 3.1 Skitse af bølgekamme set fra oven med og uden retningsspredning. (3D bølger er kortkammede og 2D bølger langkammede).

En stor værdi af  $s$  giver en meget lille spredning og dermed mere langkammede bølger, medens en lille værdi af  $s$  giver en stor spredning af bølgeenergien på retningerne. For stormkonditioner med signifikante bølger på 10 m og derover er en værdi af  $s$  på 15 fundet at være repræsentativ. For lave søtilstande ser man ofte en værdi af  $s = 1 - 2$  anvendt. Disse værdier er dog mindre underbygget i analyser af måledata. Det er forventeligt, at der ligesom for bølgeperioden kan etableres en sammenhæng mellem den signifikante bølgehøjde og en middelværdi af spredningsparameteren. Det må ligeledes forventes, at der vil være en vis variation i bølgeenergispredningen for de små søtilstande. Dette betyder, at der bør foretages en følsomhedsanalyse over for bølgespredningen for de enkelte koncepter.

### Forslag til minimumlisten af standardforsøg

Nogle koncepter vil være meget følsomme for, om der anvendes to- eller tredimensionelle bølger, lang- eller kortkammede, mens andre vil være relativt upåvirkede. Der anbefales derfor en liste af forsøg som vist i Tabel 3.2. For koncepter, der *ikke* er følsomme over for retningsspredning, udgør Serie 1, 2 og 3 en minimumsliste af forsøg i 2D bølger. Koncepter der *er* følsomme for retningsspredning afprøves i 3D bølger og følsomheden belyses ved at sammenligne forsøgs Serie 1, som udføres i 2D bølger, med Serie 4 i 3D bølger.

Forsøg		Bølgerende	Bølgebassin
Serie 1	PM-spektrum (langkammede)	2D	2D
Serie 2	Jonswap-spektrum	2D	3D
Serie 3	Periodefølsomhed	2D	3D
Serie 4	PM-spektrum (kortkammede)		3D
Serie 5	Spredningsparametervariation		3D

Tabel 3.2 Oversigt over forsøgsserier til belysning af energiproduktion

PM er her valgt til basisforsøgene ud fra en formodning om, at forsøg fra andre lande mest sandsynligt vil være udført med PM-spektre. Sensitiviteten til spektralformulering undersøges i Serie 2, medens sensitivitet til perioden undersøges i Serie 3. Det bemærkes, at bølger (søtilstande) har en naturlig variation i middelperioden, så den valgte variation er ikke udtryk for usikkerhed i fastlæggelse af middelperioden, men et udtryk for en naturlig variation. I Serie 4 undersøges effekt af energispredningen ud fra en nærmere fastlagt sammenhæng med den signifikante bølgehøjde, medens Serie 5 tjener til at vurdere følsomheden over for den valgte spredning, som kan have en ganske stor variation for givne søtilstande.

### Overlevelsesforsøg

Forsøg		Bølgerende	Bølgebassin
Serie 1	PM-spektrum (langkammede)	2D	2D
Serie 4	PM-spektrum (kortkammede)		3D

*Tabel 3.3 Oversigt over forsøgsserier til belysning af udmattelse*

Forsøg		Bølgerende	Bølgebassin
Serie 6	JONSWAP-spektrum	2D	2D
Serie 7	PM-spektrum periodefølsomhed	2D	3D
Serie 8	PM-spektrum spredningsparametervariation		3D

*Tabel 3.4 Oversigt over forsøgsserier til belysning af overlevelse*

### Serie 1: Basisforsøg i langkammede bølger (PM Spektrum)

Den første forsøgsserie omfatter fem søtilstande som angivet i nedenstående Tabel 3.5. Der er tale om langkammede bølger defineret efter spektret af typen PM. Spektrets form findes ved at indsætte de anførte værdier for  $H_s$  og  $T_p$ . Hvert bølgeforsøg skal udføres, så det svarer til 60 minutter i prototype skala (dvs. i naturen).

Forsøg nr.	Signifikant bølgehøjde $H_s$ [meter]	Middelperiode $T_z$ [sek.]	Peak periode $T_p$ [sek.]
	1	4,0	5,6
	2	5,0	7,0
	3	6,0	8,4
	4	7,0	9,8
	5	8,0	11,2

Tabel 3.5 Testmatrix 1, søtilstande til energiproduktion.

### Serie 2: Spektralformulering (JONSWAP)

For at undersøge betydningen af spektrets form på bølgeenergimaskinens energiproduktion udføres forsøg, hvor der benyttes et JONSWAP-spektrum i mindst to af de anførte søtilstande i Testmatrix A.

Forsøg nr.	Signifikant bølgehøjde $H_s$ [meter]	Middelperiode $T_z$ [sek.]	Peak periode $T_p$ [sek.]	Spredningsparameter (HVIS 3D vælges)
	2	5,0	6,5	
	3	6,0	7,9	

Tabel 3.6 Testmatrix 2, følsomhed for spektralformulering (JONSWAP).

### Serie 3: Periodevariation (PM Spektrum)

Det har interesse at kende konsekvensen af, at konstruktionen måske er tunet til en bestemt egensvingning, og at der i naturen kan optræde søtilstande med længere eller kortere middelperioder/peak perioder end anført i standardforsøgsserien tabel 3.5. Får dette meget eller kun lidt indflydelse på energiproduktionen?

Forsøg nr.	Signifikant bølgehøjde $H_s$ [meter]	Middelperiode $T_z$ [sek.]	Peak periode $T_p$ [sek.]	Spredningsparameter (HVIS 3D vælges)
	2	4,0	5,6	
	2	4,5	6,3	
	2	5,5	7,7	
	2	6,5	9,1	
	2	7		

Tabel 3.7 Test matrix 3, energiproduktionsfølsomhed ved variation af bølgeperiode.

For yderligere at undersøge følsomheden for middelbølgeperioden i søtilstande med signifikante bølgehøjder større eller mindre end  $H_s = 2$  meter, anbefales supplerende forsøg med perioder  $\pm 1$  sekund på hver side af det centrale estimat for bølgeperioden angivet i Tabel 3.5.

For hver signifikant bølgehøjde optegnes sammenhængen mellem energiproduktionens afhængighed af perioden.

#### **Serie 4: Basisforsøg, kortkammede bølger (3D PM-spektrum)**

Denne forsøgsserie belyser, hvor følsomt systemet er for retningsspredte bølger. Afhængig af den undersøgte type bølgeenergimaskine anbefales, at der udføres forsøg med retningsspredte bølger (kortkammede).

Forsøg nr.	Signifikant bølgehøjde $H_s$ [meter]	Middelperiode $T_z$ [sek.]	Peak periode $T_p$ [sek.]	Spredningsparameter $s$
	1	4,0	5,6	2
	2	5,0	7,0	3
	3	6,0	8,4	4
	4	7,0	9,8	6
	5	8,0	11,2	

*Tabel 3.8 Energiproduktion i søtilstande med retningsspredning*

#### **Serie 5: Spredningsparameter variation, (3D PM- spektrum)**

Forsøgsserien belyser, hvor følsomt systemet er for retningsspredte bølger.

Forsøg nr.	Signifikant bølgehøjde $H_s$ [meter]	Middelperiode $T_z$ [sek.]	Peak periode $T_p$ [sek.]	Spredningsparameter $s$
	2	5,0	7,0	1,5
	2	5,0	7,0	3
	2	5,0	7,0	4,5

*Tabel 3.9 Energiproduktion i søtilstande med retningsspredningsfølsomhed for spredning*

#### **Forsøgsvarighed**

Det anbefales, at forsøg udføres med en varighed svarende til 60 minutter i fuld skala. Det vil sige, at et modelforsøg i skala 1:25 vil tage 12 minutter.



## Havstrøm

Strømmen i Nordsøen hidrører dels fra tidevandet dels fra vind og trykfelters påvirkning af vandet. Hastighederne i strømmen på lokaliteter væk fra kysten med vanddybder på 20 m og derover vil kun sjældent være over 0.5 m/s. Strømmen vil næppe have den store betydning for energiproduktionen undtagen for de koncepter, der er fritliggende, drejelige og følsomme over for bølgeretningen. For denne type af koncepter kan strømmen indirekte have en uheldig effekt, hvis strømmens retning vil dreje konceptet bort fra den optimale retning for energiudtaget. Det bør derfor overvejes, om der for enkelte koncepter også skal afprøves med en strømhastighed under en ugunstig vinkel med bølgerne, eksempelvis 90 grader. En sådan undersøgelse kan også foretages ved at give modellen en påvirkning, der svarer til strømmens last og moment.

## Designsituationen (overlevelse)

Med hvor stor sikkerhed konstruktionen skal overleve de højeste forekommende bølger er ikke helt enkelt at besvare. Men det må bl.a. afhænge af investeringens størrelse. Imidlertid vil styrkedimensioneringen generelt være bestemt af større bølger, end de der er bestemmende for energiproduktionen. Det vil derfor være relevant at angive en bølgestørrelse, som kun overskrides med en vis (lille) sandsynlighed.

Den danske last- og sikkerhedsfilosofi har traditionelt opereret med designværdier svarende til 2% overskridelsessandsynlighed pr. år (svarende til en såkaldt 50-års situation) i sammenhæng med relevante partialkoefficienter. (De fleste lande opererer med 100-års bølgen som designgivende last). For faststående, pælefunderede offshore konstruktioner af stål er kravet om 50-års lasten tolket til lasten fra en 50-års bølgesituation. For flydende konstruktioner er der ikke et gældende normsæt at henholde sig til, og enkeltbølgefilosofien er ikke relevant.

De bølgeenergikoncepter, der er under overvejelse til Nordsøforhold, er hovedsageligt flydende konstruktioner forankret til havbunden. I denne situation med nye konstruktionstyper og mangel på et specifikt regelsæt må det være vigtigt at få afprøvet koncepterne så grundigt, at der bliver skabt tilstrækkeligt grundlag for at kunne vurdere designlasten tilstrækkeligt nøjagtigt, også selvom der muligvis ikke gennemføres forsøg for eksakt den designgivende kondition. Det bedste resultat opnås, hvis man har forsøgsdata for konditioner såvel over som under den endelige designkondition, hvilket giver mulighed for interpolation.

Materiale til brug for bestemmelse af designkonditioner på vanddybder og afstande fra kysten, hvor bølgeenergianlæg kan tænkes udlagt, er under udvikling, og dette afsnit vil blive opdateret, så snart slutrapporten for projektet "Bølgeenergiatlas" foreligger. Med erfaringer fra dybere vand kan følgende *tilnærmede* værdier for søtilstande angives:

Forsøg nr.	Signifikant bølgehøjde Hs [meter]	Middelperiode T <sub>z</sub> [sek.]	Peak periode T <sub>p</sub> [sek.]	Spredningsparameter s (hvis 3D vælges)
10 år				
	9		12,5	15
	<b>9</b>	<b>9,9</b>	<b>13,8</b>	15, 8
	9		14,3	15
50 år				
	10		13,0	15
	<b>10</b>	<b>10,4</b>	<b>14,5</b>	15, 8
	10		<b>16,0</b>	15
100 år				
	11		13,7	15
	<b>11</b>	<b>10,9</b>	<b>15,2</b>	15, 8
	11		16,7	15

Tabel 3.10. Overlevelsesforsøg ved 40 meters vanddybde. (Spektrum: JONSWAP)

Forsøg nr.	Signifikant bølgehøjde Hs [meter]	Middelperiode T <sub>z</sub> [sek.]	Peak periode T <sub>p</sub> [sek.]	Spredningsparameter s (hvis 3D vælges)
10 år				
	8		11,6	15
	<b>8</b>	<b>9,4</b>	<b>13,1</b>	15 og 8
	8		14,6	15
50 år				
	9		12,5	15
	<b>9</b>	<b>9,9</b>	<b>13,8</b>	15 og 8
	9		14,3	15
100 år				
	10		13,0	15
	<b>10</b>	<b>10,4</b>	<b>14,5</b>	15 og 8
	10		<b>16,0</b>	15

Tabel 3.11 Overlevelsesforsøg ved 20 meters vanddybde. Spektrum: JONSWAP

Udover en vurdering af last på konceptet for disse sammenhængende værdier af bølgehøjder og perioder skal der foretages en følsomhedsanalyse for bølgeperioden og spredningsparameteren (inklusive langkammede bølger).

Spredningsparameteren skal have værdierne 8 og 15, suppleret med langkammede bølger (s uendelig stor). Periodevariationen foretages for 50-års bølgerne med en variation i  $T_p$  på  $\pm 1.5s$  i forhold til ovenstående tabellers værdier.

Når studiet omkring energipotentialet i Nordsøen er afsluttet, vil ovenstående værdier blive opdateret for seks specifikke lokaliteter. I lyset af at der ikke i dag kan sættes koordinater på en lokalitet, hvor et bølgeenergianlæg vil blive udlagt, er ovenstående tabeller tilstrækkeligt vejledende til at kunne etablere de foreløbige værdier for designlaste på anlæggene.

Hvert forsøg skal have en varighed på 3 timer (fuld skala). Data fra hver søtilstand skal analyseres statistisk, så der etableres en ekstrem værdifordeling for de målte laste. En Weibull fordeling anbefales som standard, og for hver søtilstand angives lastværdien med en overskridelsessandsynlighed på 0.1%.

### Havstrøm i overlevelsessituationen

Designhavstrømme er ikke generelt veldefinerede i den danske del af Nordsøen. Imidlertid bør koncepter, der er lastfølsomme over for bølgeretningen, og som er drejelige, undersøges i strøm med strømhastighed på ca. 1 m/s under 0 og 90 grader med bølgerne.

### Udmattelsespåvirkning

Som bekendt havarerer konstruktionsmaterialer ved et noget lavere spændingsniveau, når dette optræder hyppigt og vekslende / pulserende, end når påvirkningen er statisk (konstant). Derfor er det relevant at observere den hyppighed (det antal gange) en vis, skiftende belastning nås. Den største belastning i de enkelte søtilstande kan f.eks. måles og antages at pulsere for hver forbipasserende bølge. Antallet af påvirkninger pr. år vil således svare til antallet af bølgetoppe, der årligt passerer bølgemaskinen. Det årlige antal påvirkninger inden for hver søtilstand er anført i nedenstående Tabel 3.12.

Søtilstand $H_s$ [meter]	1	2	3	4	5	6	10
Målt påvirkning							
Antal påvirkninger pr år [ $\cdot 10^4$ ]	450	170	1	5	7.5	2	.5

Tabel 3.12 Antal påvirkninger inden for hver søtilstand for beregning af udmattelse.

Det kan forventes, at udmattelsespåvirkninger kan være et afgørende element i designet af f.eks. fortøjningssystemer for de flydende anlæg. Undersøgelser, der tager sigte på design af anlæg til at modstå bølgepåvirkninger, skal derfor også indeholde forsøg, der kan belyse lastpåvirkninger fra de oftest forekommende søtilstande. Det er traditionelt antaget, at udmattelsespåvirkninger kan opsummeres for ét års bølger (søtilstande). For at kunne foretage en beregning af udmattelsespåvirkningen, er det nødvendigt at kende lasten for en række søtilstande, så man ved interpolation og anvendelse af scatter-diagram kan opsummere ét års påvirkning. De søtilstande, der skal anvendes, er de samme som

angivet under energiproduktionsforsøgene, dvs. signifikante bølgehøjder fra 1 m til 5 m.

Det kan overvejes, om de traditionelle søtilstande skal afløses af et såkaldt pink noise spektrum, som derefter – under antagelse af lineær sammenhæng mellem bølgehøjde og last – kan integreres sammen med ét års søtilstande og dermed give lastpåvirkningen svarende til ét års bølger.

### Krav til nøjagtighed og dokumentation

For forsøgsbetingelserne angivet i tabellerne i bilagene skal følgende nøjagtighedskrav gælde:

$H_s$  : bedre end 5%

$T_z/T_p$  : bedre end 5%

s (spredningsparameteren): bedre end 10% inden for periodeintervallet fra  $0.5 \cdot T_p$  til  $1.25 \cdot T_p$ .

Bølgespektret skal bestemmes og sammenholdes med det teoretiske spektrum. For at undgå at det genererede bølgetog består af et kortvarigt bølgetog, der gentager sig selv flere gange, skal bølgerne moduleres som en sum af sinusbølger, hvor den laves frekvens giver en bølgeperiode der er af samme længde som forsøgsserien.

Bølgehøjdefordelingen skal bestemmes og plottes og sammenlignes med Rayleigh- fordelingen.

## 4. Bølgemaskinens effektydelse

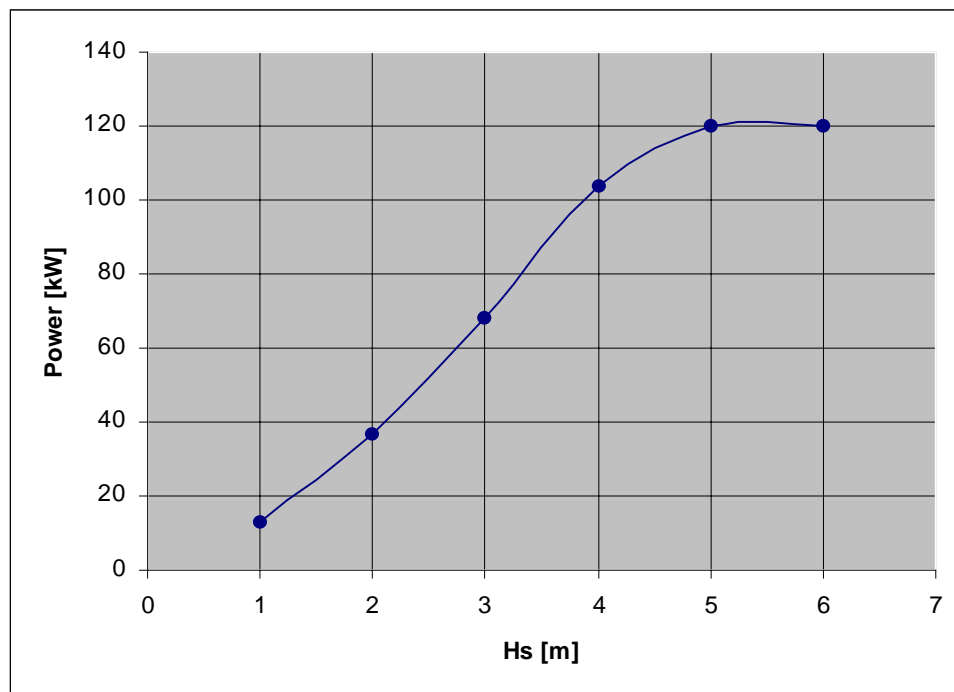
### Absorberet effekt

Brændstoffet, bølgeenergien, der skal drive bølgeenergimaskinens generator, er gratis, og det gælder om at konstruere en maskine, der kan drive en generator af en given størrelse så billigt som muligt.

Det er derfor afgørende at finde ud af, hvor meget energi en given bølgeenergimaskine kan producere på årsbasis, og ligesom en vindmølles effekt afhænger af vindstyrken, så afhænger bølgemaskinens effektydelse af den signifikante bølgehøjde  $H_s$ .

En given bølgemaskines absorberede effekt  $P_{abs}$ , kan derfor angives som funktion af  $H_s$ , på basis af modellforsøg udført i de anbefalede søtilstande i Tabel 3.5. Det vil være rimeligt i første omgang at se bort fra eventuelle variationer pga. perioden og optegne den målte sammenhæng mellem  $P_{abs}$  og  $H_s$ , som vist på Figur 4.1

Figur 4.1 Grafisk afbildning af bølgemaskinens absorberede effekt  $P_{abs}$  som funktion af den



signifikante bølgehøjde  $H_s$

## Bølgemaskiners årlige energiproduktion

Bølgemaskinens årlige energiproduktion kan beregnes på basis af skatterdiagrammet Tabel 2.2. Af tabellen fremgår antallet af timer de enkelte søtilstande på den pågældende position i havområdet forventes at fremhæve pr. år. For at beregne bølgeenergimaskinens årlige energiproduktion benyttes den målte effektkurve, og effektydelsen ved forskellige værdier af  $H_s$  aflæses.

Beregningen kan udføres som anført i nedenstående skema, hvor bølgemaskinens middeleffekt [kW] er anført for forskellige værdier af  $H_s$ .

Søtilstand $H_s$ [meter]	1	2	3	4	> 5	sum
Absorberet effekt [kW]	13	37	68	104	120	
Timer pr. år	4174	1879	839	362	149	
Energibidrag [kWh/år]	54.262	69.523	57.052	37.648	17.880	<b>236.365 kWh</b>

Tabel 4.1 Eksempel på beregning af middelenenergiproduktionen  $E_{ave}$

### Årlig middeleffekt

Den årlige middeleffekt  $P_{ave}$  beregnes ved at dividere bølgemaskinens årlige energiproduktion med antallet af timer på et år ( $365 \cdot 24 = 8760$  timer/år).

$$P_{ave} = 236365 / 8760 \text{ kWh/timer} = 27 \text{ kW}$$

### Middelindfangningseffektiviteten

Middelindfangningseffektiviteten angiver, hvor stor en del af det energipotential, der passerer bølgemaskinen, udnyttes. Dette mål fortæller noget om, hvor stor en del af ressourcen der udnyttes i forhold til bølgemaskinens dimensioner.

*Eksempel:* Den i Tabel 4.1 anførte bølgemaskine har en diameter på 10 meter. Havområdet svarende til de angivne hyppigheder i skatterdiagrammet Tabel 2.2 indeholder en middelbølgeenergiflux (rådighedseffekt) på 11.6 kW/m. Over en strækning, svarende til flyderens diameter på 10 meter, kan indfangnings-effektiviteten  $\eta_1$  beregnes til:

$$\eta_1 = \frac{P_{ave}}{20 \cdot P_{inf}} = \frac{27}{10 \cdot 11,6} = 0,23$$

For at beregne hvor stor en del af havområdets energipotential et kraftværk bestående af mange bølgemaskiner udnytter, må bølgemaskinens gennemsnitlige afstand angives. Herefter kan middeludnyttelsesgraden beregnes, og man kan vurdere, hvor meget der er til rådighed af ressourcen efter passage af anlægget. Disse forhold bliver nærmere beskrevet i Appendix A.

# 5. Metoder til effektmåling af bølgeenergianlæg

## Introduktion

I dette kapitel opsummeres metoder i forbindelse med effektmåling af forskellige bølgeenergianlæg. Der gives et overblik over, hvilke metoder der har været anvendt eller kunne anvendes til effektmåling på bølgeenergianlæg, primært i forbindelse med udførelse af modelforsøg i bølgetanke.

Pga. bølgeenergianlæggenes forskelligartede virkemåder er det oplagt, at der må anvendes forskellige målemetoder, alt efter hvilket anlæg man arbejder med. Størstedelen af anlæggene baserer sig dog på at opbygge et overtryk i væske eller luft, der ledes igennem en turbine i et fuldtløbende rør. Effektmåling ved forsøg med et sådan anlæg kan foregå ved samtidig måling af trykfald  $\delta p$  [N/m<sup>2</sup>] over turbinen og flow  $Q$  [m<sup>3</sup>/s]. Hvorledes sådanne målinger kan foretages, er nærmere beskrevet i afsnittet *Tryk- og flowmåling*.

Andre anlæg baserer sig på, at bølgerne driver en propel monteret på en aksel. Her kan effektmålingen foretages ved samtidig at måle akslens drejningsmoment  $M$  [Nm] og akslens vinkelomdrejningshastighed  $\omega$  [s<sup>-1</sup>]. Hvorledes sådanne målinger kan foretages er nærmere beskrevet i afsnittet *Moment- og vinkelhastigheds-måling*.

Endelig er nogle anlæg baseret på en relativ bevægelse mellem to dele, der er forbundet via et mekanisk system. I dette mekaniske system er indskudt en generator, der påvirker bevægelsen med modsatrettet kraft. I dette tilfælde kan effektmålingen foretages ved samtidig måling af kraften  $F$  [N] og bevægelsens hastighed  $v$  [m/s] i kraftens retning. Hvorledes sådanne målinger kan foretages er nærmere beskrevet i afsnittet *Kraft- og hastighedsmåling*.

Sidste afsnit belyser, hvorledes bølgemaskinens energiabsorption i en søtilstand fastlægges og optimeres. I referencelisten findes en oversigt over publikationer, der bl.a. omhandler effektmåling på bølgeenergianlæg, primært i forbindelse med modelforsøg.

## Tryk- og flowmåling

Når effekten af et bølgeenergianlæg ønskes målt ved hjælp af tryk- og flowmåling i et fuldtløbende rør, er en lang række forskellige apparater til rådighed. Hovedparten af disse baserer sig på at måle den tværsnitsmidlede strømningshastighed  $v$  [m/s] i et rør og så gange med rørets tværsnitsareal for at finde flowet  $Q$  [m<sup>3</sup>/s]. Måles strømhastighed alene i et punkt af tværsnittet, for

eksempel i røraksen, multipliceres med en faktor, der tager hensyn til den uensartede fordeling af hastigheden over tværsnittet. Herudover måles trykket  $p$  typisk ved hjælp af et manometer.

Som eksempler på metoder, der kan anvendes til måling af strømningshastigheder eller flow, kan nævnes:

- Ultralyd (Doppler)
- Elektromagnetisk felt
- Rotameter
- Pitotrør
- Trykfald over blænde
- Turbine-flowmeter
- Vortex-flowmeter

Tryk- og momentmåling. (Ved anvendelse af disse metoder kan der også opnås information om tangentielle strømningshastigheder). En grundigere beskrivelse af disse metoder, og tilhørende apparaturer, er at finde i Kapitel 7.

For de to førstnævnte metoder gælder det, at målingerne ikke forstyrrer strømningen, hvorimod man ved de resterende vil forstyrre strømningen ved måling.

Det er af afgørende betydning, at der ved målingerne er sørget for, at der i systemet er indbygget en modstand svarende til den turbine og de nedstrømsarrangementer, der tænkes anvendt i fuld-skala anlægget. Derfor kan de to førstnævnte principper være fordelagtige, da modstanden i disse tilfælde blot kan indbygges i røret nedstrøms for det punkt, hvor målingerne foretages, hvorimod man ved anvendelse af de øvrige metoder må udføre selve måleapparatet, således at dette yder en modstand, som svarer til turbinen og nedstrømsarrangementer i fuld-skala anlægget.

I en række tilfælde vil en del af opgaven ved et aktuelt modelforsøg være at finde ud af, hvilken turbine, og dermed modstand, der er optimal for et givet anlæg i et givet bølgeklime, hvorfor det typisk vil være ønskeligt at kunne ændre på den modstand, der simulerer turbinen, i opstillingen.

Ved måling af tryk og flow opstrøms for den indskudte modstand opnås information om den energimængde, der er til rådighed. Hvor stor en mængde energi en turbine vil være i stand til at ekstrahere heraf, vil være afhængig af dennes virkningsgrad i den aktuelle strømning, samt tryktabet nedstrøms for turbinen.

Udover de her nævnte metoder, der relaterer sig til målinger på strømninger i fuldtløbende rør, er der yderligere et par metoder, der baserer sig på måling af tryk



og flow. Den første, der skal nævnes, er anvendt ved måling på et anlæg af OWC-typen (oscillerende vandsøjle), se [12] og [13]. I dette anlæg er mediet, der skal drive en turbine, luft, og her er anvendt et lag af "tæpper" eller filt i et hul til simulering af turbinen. For disse filtstykker kendes fra vindtunnelforsøg forholdet mellem trykfald og flow. Således kan effekten findes udelukkende ud fra måling af trykket i kammeret. Denne metode er egentlig blot en variant af tidligere nævnte metode, trykfald over blænde.

Endelig kan effekten af et anlæg måles ved at lede væsken i røret op i en fastholdt kote, hvorved trykket er fastlagt, og så måle volumen af den udstrømmende væske. En variant heraf kan også benyttes ved måling på overskylsanlæg som fx. Wave Dragon, se [5]. Her er effekten målt ved, at det overskyllede volumen er registreret og ganget med trykket svarende til en vandsøjle i samme højde som den overskyllede rampe. Ved disse målinger opnås gennemsnitlige værdier af effekten, da volumen typisk måles over en længere periode.

### **Moment- og vinkelhastighedsmåling**

For de anlæg, der driver en aksel direkte, som fx. Tage Basses bølgemølle, kan anlæggets effekt måles ved at bestemme akslens drejningsmoment samtidig med dens vinkelhastighed. Dette kan gøres relativt simpelt, fx. ved at montere modstandsplader der giver et kendt moment på akslen, og så tælle antallet af omdrejninger over en given periode. Ved brug af denne metode er det også relativt ukompliceret at ændre på momentet, og derved modstanden i systemet, ved at skifte modstandspladerne, hvilket som før nævnt ofte vil være en væsentlig del af optimeringen af anlægget.

### **Kraft- og hastighedsmåling**

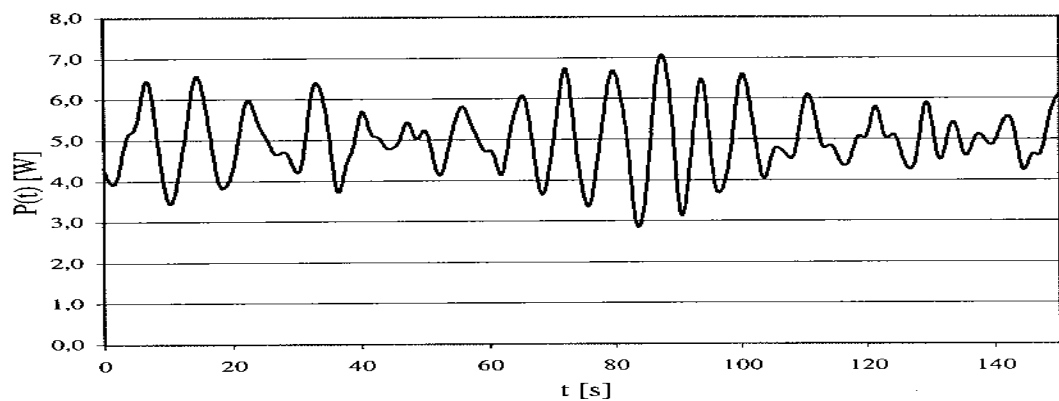
Endelig er der anlæg, som baserer sig på at omsætte fx. en flyders bevægelse direkte til mekanisk energi. Et eksempel herpå er Frede Hansens anlæg, ODIN, se [4]. I sådanne tilfælde kan effekten findes ud fra samtidige målinger af kraften hvormed bevægelsen søges hindret, svarende til den påvirkning kraftaftaget vil give på flyderen, og hastigheden, hvormed flyderen bevæger sig. I praksis kan kraften, der modvirker bevægelsen, påføres på forskellige måder, fx kan det gøres via friktion eller ved at påføre en generator. I det sidste tilfælde vil man også kunne få den producerede energimængde ved at måle direkte på generatoren. For den her skitserede metode gælder det som for de andre, at det er vigtigt, at det er muligt at ændre på modstandens størrelse af hensyn til at kunne finde den optimale størrelse af modstanden mod bevægelsen, og dermed størrelsen af generatoren.

## Målemetoder ved forskellige koncepter

De oven for præsenterede metoder til måling af effektproduktion er i det følgende koblet sammen med en række forskellige bølgeenergianlæg.

## Bestemmelse af effektproduktion

Målet med målingerne på modellerne er at bestemme effektproduktionen  $P$  som funktion af tiden  $t$  for de bølgetilstande, det vælges, at anlægget skal undersøges for jf. Kapitel 3. Sådanne målinger vil generelt resultere i en graf som den vist i Figur 5.1.



Figur 5.1. Eksempel på graf over effektproduktionen  $P$  som funktion af tiden  $t$ .

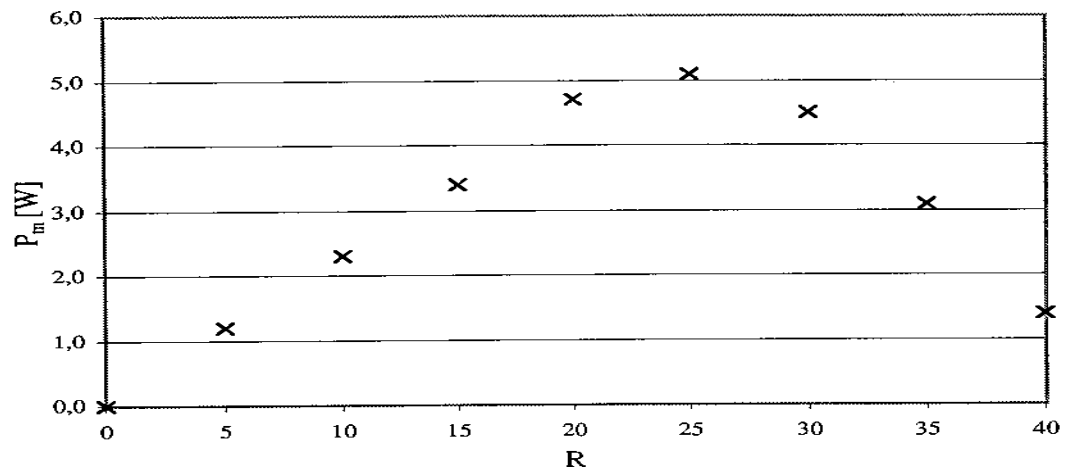
Denne effektproduktion vil i reglen være en funktion af karakteristikken af den modstand, der indbygges i anlægget til at trække energien ud, fx hvilken størrelse og type turbine der benyttes i et overskylsanlæg. Det er derfor generelt nødvendigt at bestemme  $P(t)$  for en række forskellige størrelser og typer af modstande for derved at kunne bestemme, hvilken der er den optimale for en given bølgesituation.

Når  $P(t)$  således er bestemt for en række forskellige modstande, kan den gennemsnitlige effektproduktion  $P_m$  findes ved

$$P_m = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \quad (29)$$

hvor  $T$  er perioden, over hvilken der midles. Denne skal generelt være så lang, at  $P_m$  er konstant for en given bølgetilstand.

Ved afbildning af  $P_m$  som funktion af den indbyggede modstand fås en graf, som vist i Figur 5.2.



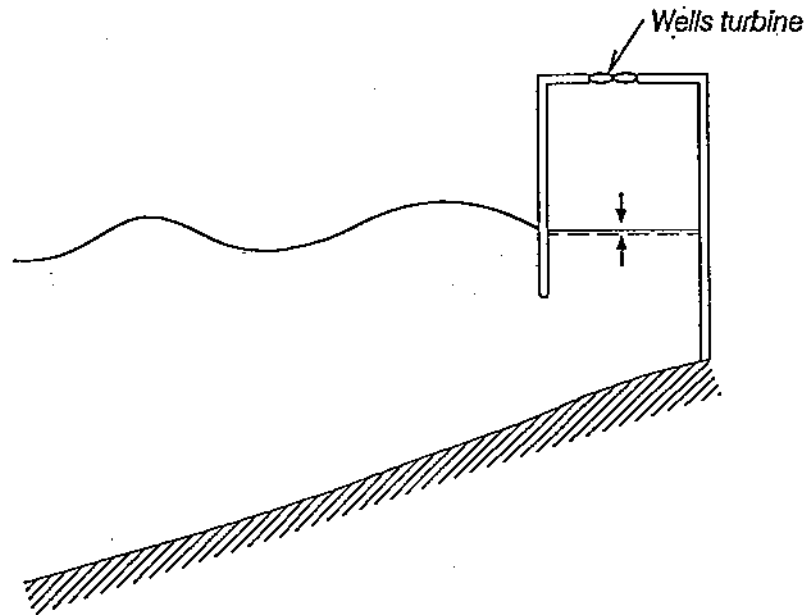
Figur 5.2 Eksempel på graf over den gennemsnitlige effektproduktion  $P_m$  som funktion af den indbyggede modstand  $R$ .

Af denne Figur 5.2 kan den modstand, der giver den største gennemsnitlige effektproduktion i den aktuelle bølgesituation, således aflæses. Ved valg af system til ekstrahering af energi, fx valg af turbiner, skal det system, der kommer tættest på denne optimale modstand i forskellige bølgesituationer, som anlægget forventes at skulle producere energi i, således vælges.

## 6. Effektbestemmelse for udvalgte koncepter

Metoden til bestemmelsen af  $P(t)$  vil variere, alt efter hvilket koncept der undersøges. I det følgende redegøres der for, hvorledes  $P(t)$  bestemmes for udvalgte koncepter.

### Svingende vandsøjler ( OWC )



Figur 6.4 Et eksempel på en OWC

Dette koncept har bl.a. i Portugal været genstand for en del eksperimentelle undersøgelser. I disse er  $P(t)$  bestemt ved hjælp af

$$P(t) = q(t)\delta p(t) \quad (30)$$

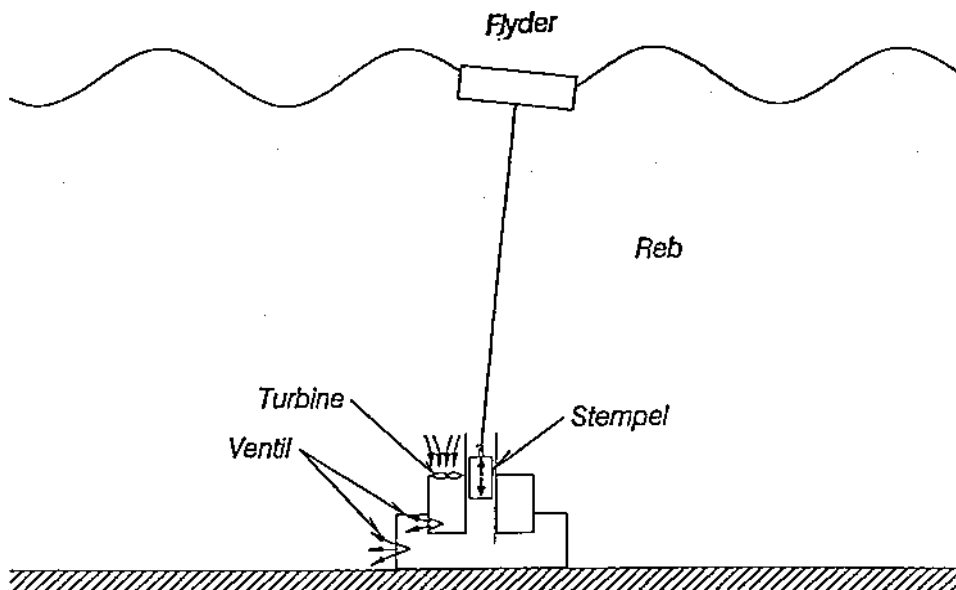
hvor flowet  $Q(t)$  bestemmes ud fra trykfaldet over turbinen  $\delta p(t)$  ved hjælp af en relation mellem tryk og flow. Trykfaldet  $\delta p(t)$  måles ved hjælp af et manometer. Relationen mellem  $Q$  og  $p$  findes ved hjælp af ved vindtunnelforsøg med de anvendte "filtstykker", og fås typisk på formen

$$\delta p(t) = n \frac{C_1}{A} Q(t) + n \frac{C_2}{A} Q(t)^2 \quad (31)$$

hvor  $C_1$  og  $C_2$  er kalibreringskonstanter.  $n$  er antallet af lag af filtstykker, der indsættes til simulering af Wells turbinen, der trækker generatoren. Ved denne fremgangsmåde er det muligt at ændre på modstanden hidhørende fra turbinen ved at ændre på antallet af lag af filtstykker.

## Point absorbere

### Kim Nielsens point absorber



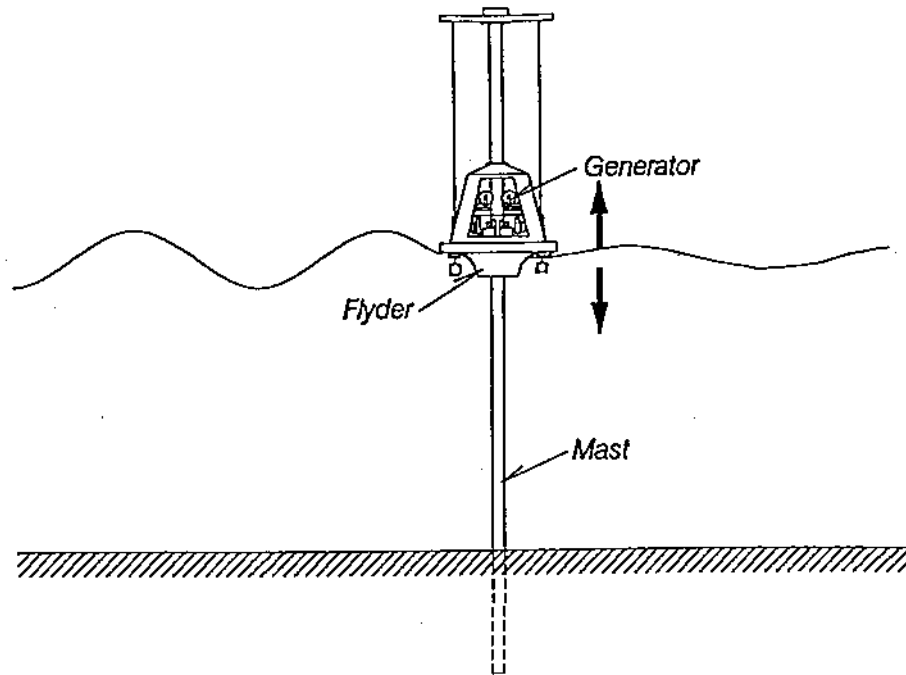
Figur 6.1 Kim Nielsens point absorber.

For dette koncept, hvor flyderen trækker et stempel, der genererer en strømning igennem en turbine, kan  $P(t)$  bestemmes af

$$P(t) = Q(t)\delta p(t) \quad (32)$$

hvor tidsserier af flowet  $Q(t)$  og trykfaldet over turbinen  $\delta p(t)$  måles ved en af de i afsnit "tryk flow" angivne metoder. Modstanden, der skal simulere turbinen i systemet, kan enten laves ved hjælp af en blænde, hvis areal kan varieres, eller indbygges som en del af det anvendte måleinstrument, jf. tidligere.

## Odin



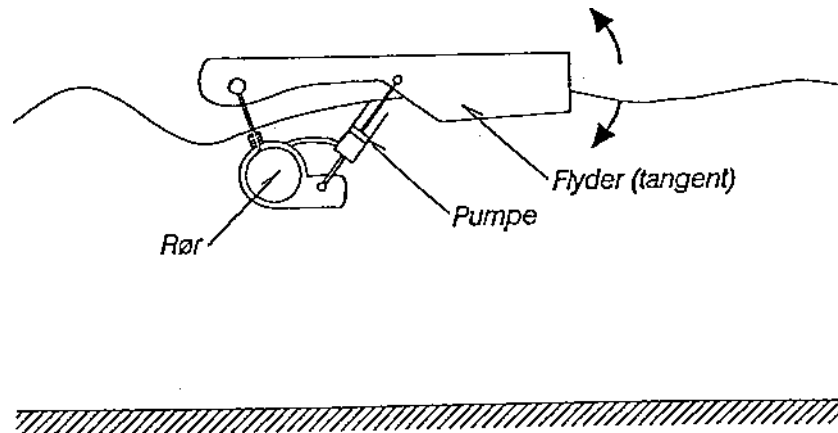
Figur 6.3 Point absorberen ODIN

For dette koncept, hvor flyderen via en udveksling mellem mast og flyder trækker et svinghjul, der igen driver en generator, kan  $P(t)$  bestemmes af

$$P(t) = F(t) v(t) \quad (33)$$

Hastigheden  $v(t)$  af flyderens vertikale bevægelse kan fx måles ved hjælp af et drejepotentiometer eller et accellerometer. Kraften  $F(t)$ , der modvirker flyderens bevægelse og dermed skal simulere krafttaftet, kan påføres ved friktion mellem mast og flyder eller ved indbygning af en dæmper. I begge tilfælde kan en direkte måling af  $F(t)$  dog være problematisk, hvorfor det kan være nødvendigt at antage en konstant  $F$  eller en variation med  $v(t)$ .

## Poseidons organ



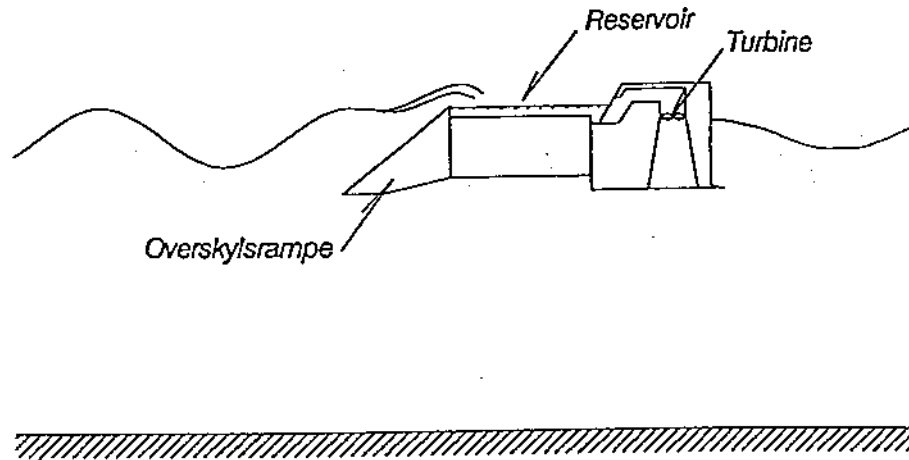
Figur 6.5 Poseidons organ.

Dette koncept består af en række flydere (point absorbers), der hver især pumper vand ind i et rørsystem. Energien udnyttes ved at lede det indpumpede vand igennem en turbine. Ved måling på dette anlæg kan der enten fokuseres på en enkelt flyder eller på anlægget som et hele. I begge tilfælde kan  $P(t)$  bestemmes af

$$P(t) = Q(t)\delta p(t) \quad (34)$$

ligesom for Kim Nielsens point absorber.

### Wave Dragon



Figur 6.6 Wave Dragon.}{fig:WD}

For et overskylsanlæg som Wave Dragon, hvor der sker en udjævning af energiproduktionen pga. reservoiret, kan effektproduktionen både opgøres ud fra energien, der opsamles i reservoiret, og ud fra hvad der ledes gennem turbinen.

Effekten i reservoiret kan bestemmes ved

$$P(t) = Q(t)p \quad (35)$$

hvor  $p$  regnes konstant som

$$P = \rho gh \quad (36)$$

hvor  $\rho$  er vandets densitet,  $g$  tyngdeaccelerationen og  $h$  er afstanden mellem middelvandspejlet og den forventede middelvandstand i reservoiret. Ved denne opgørelse af effektproduktionen er interaktionen med flowet igennem turbiner og afløb ikke medtaget.

For at få den optimale udnyttelse af energien opsamlet i reservoiret må turbinerne styres, således at vandspejlet i reservoiret i gennemsnit ligger så højt som muligt, uden at det oversvømmes. Hvis flowet ud af reservoiret styres realistisk (dvs. at vandet pumpes ud af reservoiret med et flow, der svarer til, hvad der vil passere turbinerne i den givne bølgesituation) kan effekten til turbine og afløb måles ved

$$P(t) = Q(t) \rho g h(t) \quad (37)$$



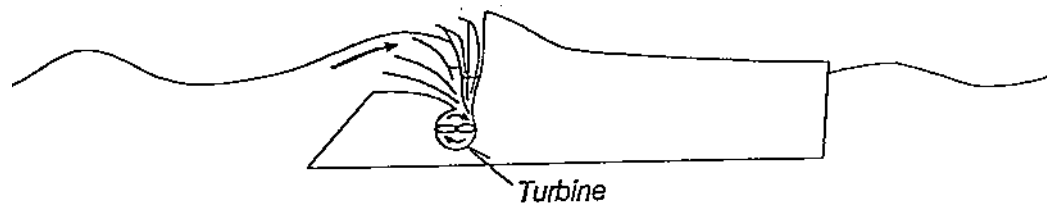
hvor  $h(t)$  er den aktuelle afstand mellem middelvandspejlet og middelvandstanden i reservoiret.

Alternativt kan den producerede effekt, dvs. turbinens effekt, findes ved

$$P(t) = Q(t)\delta p(t) \quad (38)$$

hvor  $Q(t)$  og trykforskellen  $\delta p(t)$  på de to sider af turbinen måles direkte i turbinerørene. Modstandene, der skal simulere turbinerne i systemet, kan enten laves ved hjælp af blænder, hvis areal kan varieres, eller indbygges som en del af de anvendte måleinstrumenter, jf. tidligere.

### Bølgehøvlen



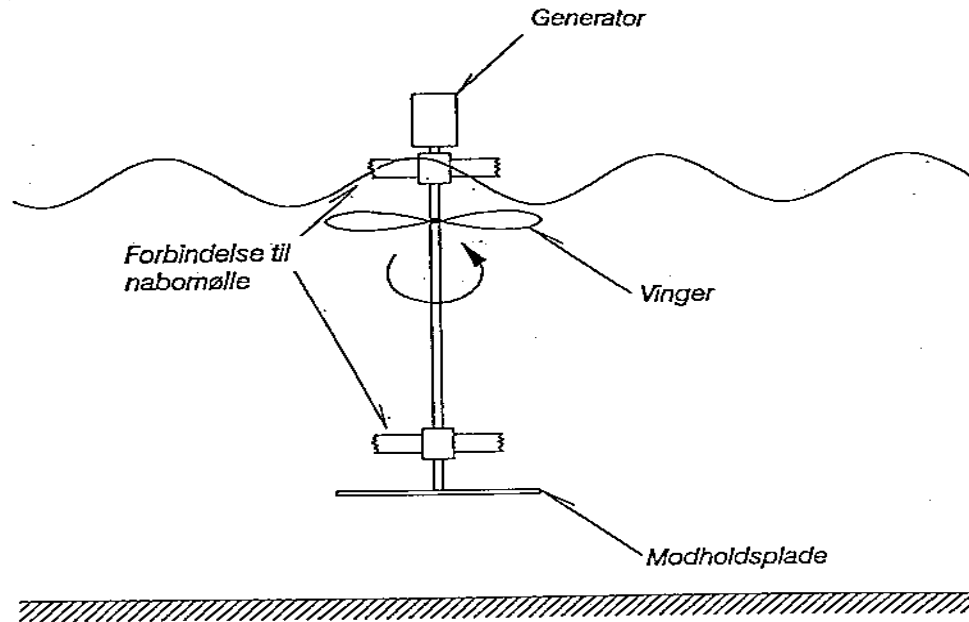
Figur 6.7 Bølgehøvlen

Dette koncept baserer sig på, at bølgerne ved at overskylle lamellerne opbygger et overtryk samt en rotation i afgangsrøret. Den producerede effekt kan findes ved

$$P(t) = Q(t)\delta p(t) \quad (39)$$

hvor  $Q(t)$  og  $\delta p(t)$  måles på de to sider af turbinen. Igen kan modstanden, der skal simulere turbinen i systemet, enten laves ved hjælp af en blænde, hvis areal kan varieres, eller indbygges som en del af det anvendte måleinstrument, jf. tidligere.

### T. Basses bølgemølle



Figur 6.2 T. Basses bølgemølle

For dette koncept, hvor de vandret liggende vinger drives rundt af de vertikale partikelbevægelser i bølgerne, kan  $P(t)$  bestemmes af

$$P(t) = M(t)\omega(t) \quad (40)$$

hvor  $M(t)$  er omdrejningsmomentet, og  $\omega$  er vinkelhastigheden. Systemet kan påføres en belastning til simulering af generatorer ved at montere cirkulære modstandsplader med et kendt areal på en arm i en fast afstand fra omdrejningsakslen. Modstandspladerne placeres tæt ved bunden, hvor bølgebevægelserne er negligeable.

Ved at bestemme  $\omega(t)$  ved hjælp af fx en omdrejningstæller kan modstandspladernes hastigheder, og dermed også kræfterne på disse, bestemmes, og herved haves også  $M(t)$ . Alternativt kan  $M(t)$  bestemmes ved hjælp af et dynamometer.

Endelig kan omdrejningsakslen forbindes direkte til en generator, hvor man ved en belastning af generatoren med en kendt elektrisk modstand  $R_e$ , samt måling af den genererede spændingsforskel  $U(t)$ , kan beregne  $P(t)$  ved

$$P(t) = \frac{U(t)^2}{R_e} \quad (41)$$

## 7. Instrumentering af energiproduktionsmålinger

### Introduktion

I forbindelse med afprøvninger af bølgeenergimaskiner er det nødvendigt at kunne bestemme den effekt, som energimaskinerne kan levere. De fleste bølgeenergimaskiner producerer energi ved at drive en turbine. Idet udformningen af den endelige turbine som regel ikke kendes, når modelforsøgene udføres, og en modellering af selve turbinen vil være meget bekostelig, vil det i de fleste tilfælde være tilfredsstillende at bestemme den effekt, som er tilstede i den rørstrømning, som skal drive turbinen. Den endelige effekt, som bølgeenergimaskinen kan forventes at levere, kan derefter bestemmes ud fra turbinens virkningsgrad.

I det efterfølgende afsnit vil forskellige målemetoder til bestemmelse af effekten i en rørstrømning blive beskrevet.

En del af de bølgeenergimaskiner, som fungerer efter det såkaldte “flytter”-princip, producerer energi ved at bevæge en form for stempel, som eksempelvis kan drive et hydraulisk system. Det sidste afsnit i kapitlet vil beskrive en metode til bestemmelse af den effekt, som påføres et stempel.

### Effektbestemmelse af væske i en rørstrømning

Effekten af en væske i en rørstrømning kan bestemmes ud fra flowet gennem røret og Bernoullis ligning. Man får:

$$P = Q(\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh + \Delta p) \quad (42)$$

hvor:

$P$  = effekten [W]

$Q$  = flowet gennem røret [ $m^3/s$ ]

$v$  = partikelhastigheden i strømningen [ $m/s$ ]

$\rho$  = væskens massefylde [ $kg/m^3$ ]

$g = \text{tyngdeaccelerationen } [m/s^2]$

$h = \text{højde over et frit valgt referencepunkt}^* [m]$

$\Delta p = \text{væsketrykket målt i forhold til trykket målt i referencepunktet}^* [Pa]$

$^* h \text{ og } \Delta p \text{ måles fra samme referencepunkt}$

De fleste målemetoder kræver, at et instrument indskydes i strømmingen. Dette medfører afhængigt af dets udformning en forstyrrelse af strømmingen, som giver anledning til et effekttab. Det er derfor vigtigt, at effekten af rørstrømmingen bestemmes opstrøms instrumentet.

Væsketrykket bestemmes ved at placere trykudtag i rørets periferi. Trykudtagene skal placeres på det sted på røret, hvor man ønsker at bestemme den tilstedeværende effekt. Trykket måles relativt til det hydrostatiske tryk i det valgte referencepunkt.

Under forsøg med flydende konstruktioner i bølger kan det være et problem, at trykket varierer kraftigt, når modellen overskylles med bølger, og når modellen bevæger sig i søen. Det kan derfor være hensigtsmæssigt at placere referencepunktet ved turbinerørets udløb eller i et andet punkt, hvor trykket kan forventes at variere i samme takt som trykket i turbinerøret.

Tryktransducerne bør så vidt muligt placeres på modellen, således at trykslangerne bliver så korte som muligt, og transduceren følger modellens bevægelser.

I tilfælde hvor trykfaldet mellem turbinen og turbinerørets udløb er lille (dvs. ingen strømningsmæssige hindringer mellem turbine og udløb f.eks. ved brug af ultralydsmålinger), kan trykleddet negligeres i ligning (1), idet al energien i dette tilfælde vil være kinetisk.

Partikelhastigheden  $v$  består af en aksial ( $v_a$ ) og en tangentiell ( $v_t$ ) hastighedskomponent

således at:

$$v = \sqrt{v_a^2 + v_t^2} \quad (43)$$

I de fleste tilfælde vil den tangentielle hastighedskomponent være negligerbar, men i strømninger med kraftig rotation må den tangentielle hastighedskomponent medtages i beregningerne, og det kan yderligere være nødvendigt at korrigere det målte tryk, idet centrifugalkraften vil forøge dette. Det reducerede tryk,  $\Delta p_r$ , findes ud fra følgende udtryk:

$$\Delta p_r = \Delta p - \frac{1}{3} \rho \Omega^2 R^2 \quad (44)$$

hvor:

$R = \text{rørets radius}$

$$\Omega = \text{rotationens vinkelhastighed} \left( \approx \frac{\bar{v}_t}{0.7R} \right)$$

$\bar{v}_t = \text{den tangentielle middelhastighed}$

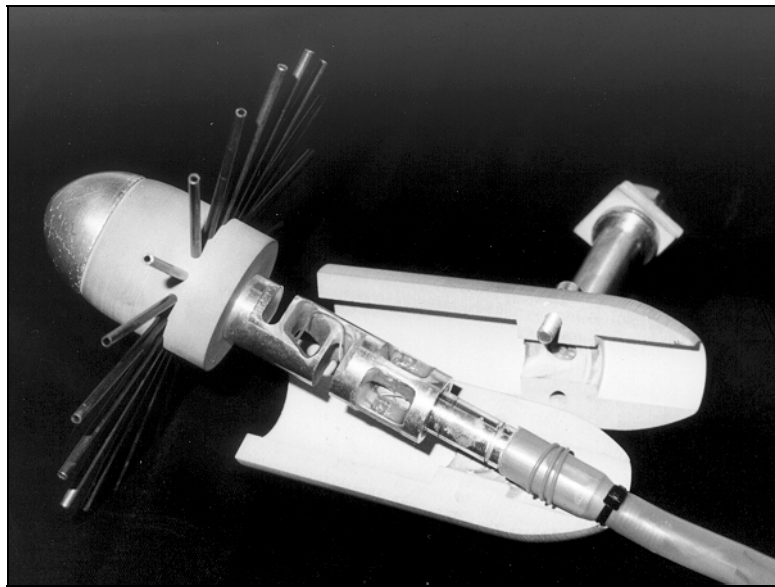
Flowet i røret kan bestemmes ud fra strømningens aksiale middelhastighed  $\bar{v}_a$  og rørets tværsnitsareal:

$$Q = \bar{v}_a A \quad (45)$$

Til bestemmelse af middelhastighedskomponenterne kan man benytte flere principper, som vil blive beskrevet i det efterfølgende.

Det skal bemærkes, at den effekt, som bestemmes, er den absolutte effekt, som er tilstede i den strømmende vædske i røret. Hvor stor en del af denne energi, der kan udnyttes, afhænger først og fremmest af turbinens virkningsgrad.

### Tryk og momentmåling



Figur 7.1. Instrument til måling af tryk og moment.

Instrumentet placeres i turbinerørets centerlinie, og pindene tilpasses turbinerørets diameter, således at pindene når helt ud til rørvæggen uden at røre denne. Når vandet strømmer gennem røret, vil det inducere et drag på pindene. Dragkræfter vil medføre en trykkraft og et moment (hvis der er en tangentiell hastighed i strømningen). Trykkraften og momentet måles ved hjælp af strain gauges, som er monteret på en kraftblok i instrumentets kerne.

Instrumentet giver en god bestemmelse af middelhastighederne gennem røret og er istand til at bestemme såvel den tangentielle som den aksiale hastighedskomponent. Instrumentet kræver dog en rimelig homogen strømning i

røret, idet for store hastighedsforskelle i rørets tværsnit vil medføre unøjagtigheder i bestemmelsen af hastigheden.

Instrumentet kan udformes, så forstyrrelsen af strømmingen i røret bliver minimal eller tilpasses, så det modsvarer modtrykket fra en turbine.

Den aksiale middelhastighedskomponent bestemmes ud fra trykkraften ved:

$$\bar{v}_a = \sqrt{\frac{T}{\frac{1}{2}\rho A_p C_D}} \quad (46)$$

hvor:

$T = \text{den inducerede trykkraft [N]}$   
 $A_p = \text{frontarealet af pindene på instrumentet [m}^2\text{]}$   
 $C_D = \text{dragkoefficienten af pindene på instrumentet [-]}$

Den tangentielle middelhastighedskomponent bestemmes ud fra momentet ved:

$$\bar{v}_t = \sqrt{\frac{M}{\frac{1}{2}\rho A_p C_D 0.7R}} \quad (47)$$

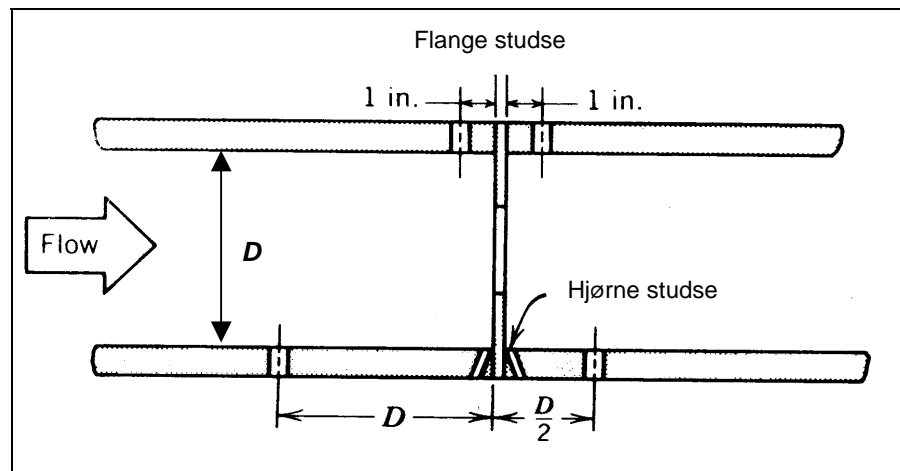
hvor:

$M = \text{momentet [Nm]}$

Det kan være nødvendigt at korrigere hastighederne for den reduktion af fristrømsarealet, som instrumentet forårsager.

Instrumentet kræver en rørdiameter på minimum 120 mm, for at pindene kan få en tilfredsstillende længde.

### Blændemåling



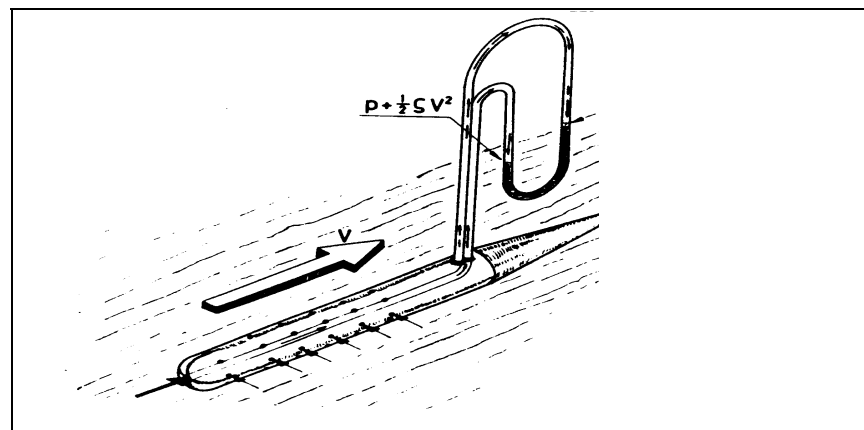
Figur 7.2 Eksempel på blænde til måling af strømningshastighed

Ved at benytte en blænde kan man bestemme den aksiale hastighed, men ikke den tangentielle. Blændemålinger kræver en jævn strømning i røret, hvilket kan opnås ved at sikre et ugeneret tilløb til målesektionen på mindst 10 gange rørdiameteren. Flowet gennem røret bestemmes ved at måle trykfaldet over blænden. Blænderne kan fås i flere varianter og udformninger, som hver især har fordele og ulemper med hensyn til pris, nøjagtighed og tryktab.

Trykfaldet er proportionalt med kvadratet på flowet. I praksis skal størrelsen af blænden bestemmes ud fra det største forventede flow. På grund af ulineariteten mellem trykfald og flow er den variation i flow, som kan blive bestemt med tilfredsstillende præcision, begrænset.

Blændemålingers store fordel er, at det er meget simpelt udstyr, som kun kræver en måling af trykfaldet over blænden. Blændemålinger kan anvendes på alle rørstørrelser.

### Måling med pitotrør



Figur 7.3 Måling med et pitotrør.

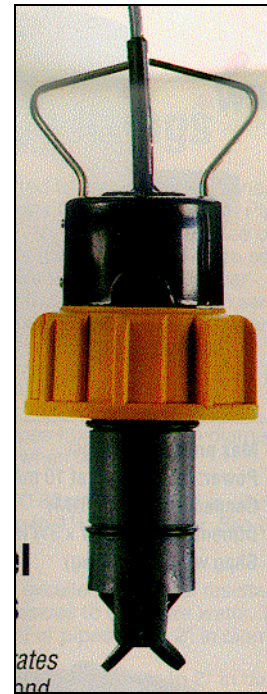
Strømningshastigheden i et enkelt punkt kan bestemmes ved brug af et pitotrør. Hastigheden bestemmes ud fra Bernoullis ligning ved at måle trykforskellen mellem stagnationstrykket på rørets forside og det statiske tryk målt på siden af røret.

Pitotrøret kan bestemme både den aksiale og den tangentielle hastighed, men kun i ét punkt ad gangen, hvilket gør denne metode uanvendelig til bestemmelse af middelhastigheder over hele rørets tværsnitsareal, med mindre der er tale om en stationær strømning.

## Turbine flowmeter



Figur 7.4 Turbine flowmeter



Figur 7.5 Skovlhjul

Et turbine flowmeter indeholder en lille propeller eller turbine og udsender et elektrisk signal proportionalt med omdrejningstallet på turbinen og dermed med flowet.

Flowmeteret kan kun måle den aksiale hastighed, og største nøjagtighed opnås med et ugeneret tilløb på mindst 10 gange rørdiameter opstrøms sensoren.

Et turbine flowmeter koster 1.500-8.000 kr. afhængigt af rørdiameter (5-50 mm); dertil kommer tilslutning til dataopsamlingsudstyr.

Turbine flowmeteret findes i en anden variant, hvor et skovlhjul placeret på en arm indføres i røret. Skovlhjulet stiller større krav til et ugeneret tilløb, men har den fordel, at samme skovlhjul kan anvendes på rør med en større variation i diameter. Skovlhjul kan anvendes på rør i størrelserne fra 6 til 300 mm i diameter.

## Dynamo

Ved at placere en turbine eller propeller i rørstrømningen og lade denne trække en dynamo kan man direkte måle den effekt, som dynamoen leverer. Hvis turbinen er udformet som den endelige turbine, er den udtagne effekt et mål for den endelige effekt, som bølgeenergimaskinen kan levere. Er dette ikke tilfældet, kan man ud fra turbinens/propellerens virkningsgrad bestemme effekten af strømmingen og ud fra denne bestemme den endelige effekt, som energimaskinen kan forventes at levere.



### Ultralyd doppler flowmeter

Ultralyds doppler systemer måler flowet gennem røret ved hjælp af ultralyd. En sensor monteres uden på røret og kan ved hjælp af frekvensskift (doppler effekt) bestemme middelhastigheden i strømmingen, men kun i aksial retning.

Systemet kræver, at strømmingen indeholder bobler eller partikler med en koncentration af mindst 25 ppm og mindst 30  $\mu\text{m}$  i størrelse. Dette kan skabe problemer, hvis udstyret skal anvendes i en prøvetank, hvor vandet sædvanligvis er meget rent.



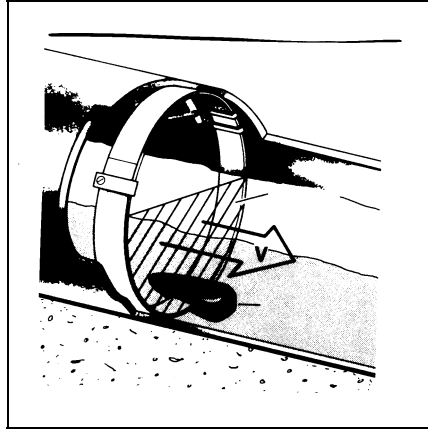
Figur 7.6 Ultralydssensoren monteres uden på røret.

En stor fordel ved udstyret er, at det uden videre kan anvendes på alle rør med en diameter mellem 10 og 750 mm. Udstyret er meget nemt at montere, idet det fastgøres uden på røret.

Udstyret koster 10.000-20.000 kr.

### Elektromagnetisk flowmåling

Et elektromagnetisk flowmeter laver et magnetisk felt i strømmingen. Når en konduktiv væske strømmer gennem dette felt induceres en spænding, som er proportional med flowhastigheden gennem røret. Flowmeteret bestemmer kun den aksiale hastighed.

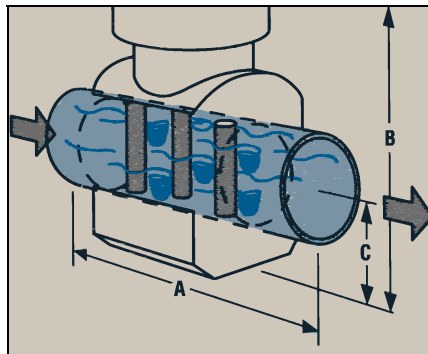


Figur 7.7 Elektromagnetisk sensor placeret i strømmingen.

De fleste elektromagnetiske flowmålere er lavet til en specifik rørdiameter, men der findes også typer, som kan anvendes i rør med varierende diameter (50 - 300 mm), hvor sensoren placeres inde i røret. Udstyret koster omkring 20.000 kr.

### Vortex-flowmeter

Et vortex-flowmeter bestemmer strømningshastigheden ved at måle frekvensen af hvirveldannelsen på et element neddykket i væsken. Frekvensen er proportional med flowet gennem røret og kan bestemmes ud fra de trykfluktuationer, som hvirvlerne forårsager på det neddykkede element. Flowmeteret er ikke velegnet til strømninger med tangentielle hastigheder.



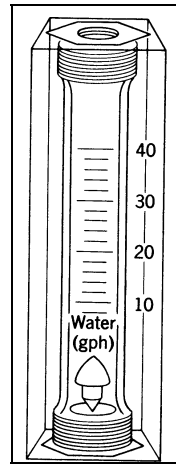
Figur 7.8 Opbygningen i en vortex sensor

Udstyret kan anvendes på rør på op til 50 mm og koster 6.000-10.000 kr.

### Fyldning af kar eller ballon

Et mere primitivt princip kan bygge på fyldning af et kar eller en pose med kendt rumfang. Ved at betragte den tid som bølgeenergimaskinen er om at fylde den pågældende beholder, kan en gennemsnitsværdi for flowet bestemmes men altså ikke en præcis bestemmelse af energiproduktionen, hvis denne varierer meget over tiden.

## Rotameter



Figur 7.9 Et variabelt areal flowmeter eller rotameter

Flowet gennem et rotameter bestemmes ved aflæsning af en flyders højde. Rotametret er udformet og kalibreret, således at skalaen er lineær, og således at forskellige flydere kan anvendes, alt efter hvor kraftigt flowet er gennem røret.

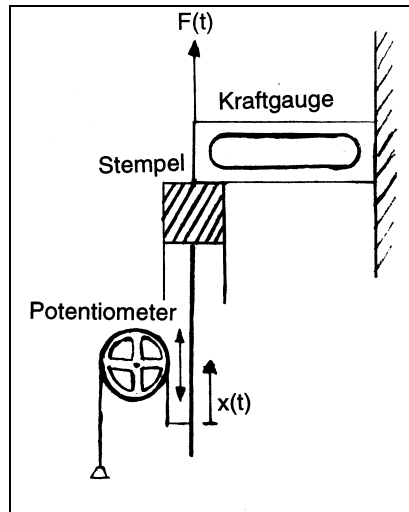
Et rotameter kan således anvendes til en manuel aflæsning af flowet, men ved varierende strømningshastighed, som der må forventes at være i de fleste bølgeenergimaskiner, er instrumentet vanskeligt at aflæse og dermed at anvende.

## Luftstrømninger

De i forrige afsnit beskrevne metoder til bestemmelse af flow er lavet ud fra den forudsætning, at der er tale om en væskestrømning. Man kan også forestille sig, at det kunne være en luftstrømning, som driver turbinen (OWC-systemer). Grundlæggende er der ingen forskel på en væske- og en luftstrømning, og derfor kan de samme ligninger til bestemmelse af strømningens effekt benyttes. Ligeledes kan mange af de målemetoder til bestemmelse af flowet, som er beskrevet, anvendes på såvel væske som luftstrømninger. Målemetoderne med tryk- og momentmåling, blændmåling, måling med pitotrør, dynamo, fyldning af kar og rotameter kan direkte anvendes på luftstrømninger.

## Bestemmelse af den mekaniske effekt som påføres et stempel

Det mekaniske arbejde, som en cylinder bliver påført, er lig med den kraft, som stemplet bliver påvirket med ganget med flytningen af stemplet. Idet effekt er defineret som arbejde pr. tid, kan effekten bestemmes ved at måle den kraft, som stemplet bliver påvirket med, og den hastighed hvormed stemplet flyttes.



Figur 7.10 Principskitse til bestemmelse af effekt afsat i stempel.

Kraften som påvirker stemplet,  $F(t)$ , kan bestemmes ved at fastgøre stemplet til en kraftmåler (kraftgauge). Stempelstangens position,  $x(t)$ , kan f.eks. måles med et potentiometer, og stemplets hastighed,  $v(t)$ , er givet ved differentiation af  $x(t)$ :

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = \dot{x}(t) \quad (48)$$

Man får således effekten:

$$P(t) = F(t) \cdot \dot{x}(t) \quad (49)$$

Hvis man ser bort fra friktion og dynamiske accelerationskræfter, så kan kraften,  $F(t)$  også bestemmes ved at måle trykket i cylinderen, idet

$$F(t) = A_s p(t) \quad (50)$$

hvor:

$A_s$  = stemplets effektive areal

$p(t)$  = trykforskellen over stempelet i cylinderen til tiden  $t$

Det skal bemærkes, at definitionerne i dette afsnit gælder generelt, og at ligningerne derfor direkte kan overføres til andre mekaniske systemer.

## Moment og omløbstal

Effekten, som genereres af f.eks. en bølgemølle, kan bestemmes ved hjælp af et dynamometer. Et dynamometer er et forholdsvis dyrt instrument, som måler det moment, som en roterende aksel overfører. Ved samtidig at måle omløbstallet kan effekten bestemmes idet:

$$P = M\omega \quad (51)$$

hvor:

$M$  = *det moment som møllen yder*

$\omega$  = *er vinkelhastigheden*

### **Eksperimentel bestemmelse af optimal energiabsorption**

Til bestemmelse af optimal energiabsorption er det nødvendigt at designe sin model, så det er muligt at regulere eksempelvis modtrykket i turbinerøret ved indsættelse af dyser eller lignende og på den måde finde det modtryk og dermed flow, som giver den maksimale energiabsorption. For hydrauliksystemer kan trykket i højtrykscylinderen eller stempelstangens vandring reguleres, og for bølgemøller og lignende kan man ændre det påførte moment.

Normalt vil det være fornuftigt at fastlægge en designkondition/søtilstand, for hvilken man ønsker at optimere energimaskinen. I nogle fornuftigt valgte regelmæssige bølger kan man forholdsvis hurtigt finde den indstilling af f.eks. modtryk i turbinen, som giver den bedste absorption, og denne indstilling kan derefter prøves og finjusteres i uregelmæssig sø. Bølgeenergimaskinen skal dernæst testes ved andre konditioner end designkonditionen for at sikre, at en rimelig energiabsorption også kan finde sted ved disse konditioner.

## 8. Rapportering af forsøg

### Indledning

For at formidle et overblik over resultater opnået under de bølgekraftprojekter, der gennemføres under Bølgekraftprogrammet, anbefales en ensartet struktur for forsøg og rapportering. Med baggrund i de anbefalede bølgeforsøg i kapitel 3 beskrives i Appendiks A en metodik, som kan anvendes til beregning af energiproduktionen fra bølgekraftmaskiner, således at resultater fra forsøg med forskellige typer bølgekraftmaskiner kan sammenlignes.

Omfanget af rapporten vil afhænge af det udviklingstrin, bølgemaskinen er afprøvet på, og niveauet må indledningsvis anføres. Som et forslag til en disposition for afrapportering anbefales følgende struktur:

- Bølgemaskinen, princip og tegning
- Formål og Baggrund
- Konklusion og sammendrag
- Valg af fremgangsmåde og beskrivelse af metodik
- Resultater og konklusioner
- Økonomisk oversigt
- Forslag til fortsat udvikling
- Appendiks

### Bølgemaskinen, princip og tegning

Bølgemaskinens princip beskrives. Afsnittet bør endvidere indeholde:

*Tabel med hoveddata for bølgemaskinen.*  
*Målsat tegning af prototype anføres.*

## Formål og baggrund

Projektets formål beskrives. Projektets baggrund med henvisning til tidligere gennemførte forsøg og undersøgelser anføres.

## Konklusion og sammendrag

For at give et overblik over bølgekraftmaskinens energiproduktion foreslås en oversigt, som vist på Tabel 8.1. Skemaet er opbygget, så det viser den årlige energiydelse, dels fra en enkelt bølgemaskine og dels fra et stort kraftværk. På skemaet kan man notere forhold, der endnu ikke er underbygget med forsøg og beregninger, men som foreløbigt er baseret på skøn.

Beskrivelse af lokalitet	Nordsøen	
Weibull parametre for $H_s$ (k h) (alle retninger)	(1 9 1 5)	
Middel bølgeenerginiveau [kW/m]	15	
<b>Data for en bølgemaskine (120 kW)</b>		
Bølgekraftmaskinens udstrækning [m]	10 m	
Årlig rådighedseffekt (middel) [kW]	150 kW	
Absorberet effekt (årlig middel) [kW]	33 kW	
Indfangningseffektivitet (middel)	22 0%	
Mekanisk virkningsgrad (middel)	0 92	
Installeret generatorkapacitet pr. maskine [kW]	140 kW	
Middelvirkningsgrad for turbine og generator	0 66	
Elektrisk midleffekt (pr. Maskine) [kW]	20 kW	
Samlet virkningsgrad (fra bølge til elektrisk energi)	13%	
<b>Data for et stort kraftværk (370 MW)</b>		
Antal bølgemaskiner	2643	
Afstand mellem bølgemaskiner [m]	20 m	
Anlagt strækning [m]	52857 m	
Årlig rådighedsenergi [mio kWh]	6945 mio Wh	
Transmissionsvirkningsgrad	0 94	s
Rådighedsfaktor	0 95	
Retningsfaktor indfangningseffektivitet	1	s
Årligt ilandført energi [mio kWh]	414 mio kWh	
Total omformningseffektivitet	6%	

Tabel 8.1 Oversigt fra Danish Wave Power, rapport "Hanstholm fase 2B"[2].

Beregningerne som skal udføres for at udfylde skemaet er beskrevet i Appendiks A, illustreret med resultaterne fra Danish Wave Powers (Kim Nielsens) Point absorber forsøg [2].

## Valg af fremgangsmåde og metodik

I dette afsnit beskrives fremgangsmåden ved forsøg og beregning af energiproduktion, herunder bl.a.:

- Forsøgsopstilling*
- Skala for forsøg anføres*
- Målsat tegning af forsøgsmodel anføres med referencenummer*
- Måleprogram*
- Undersøgte bølgeforhold*
- Beregning af energiproduktion*
- Overlevelsesh- og designforhold*
- Matematiske og numeriske modeller*

## Resultater og konklusioner

I afsnittet anføres resultater af undersøgelser og forsøg foretaget i projektet.

- Energiproduktion*
- Overlevelse og designforhold*
- Komponentafprøvning*
- Strukturelt design*

## Økonomisk oversigt

Som et værktøj til udvikling og optimering af bølgekraftmaskinens design foreslås en økonomisk oversigt, som omfatter fem hovedelementer:

- Havne- og udskibningsfaciliteter*
- Bølgemaskinens struktur, komponenter og forankring*
- Mekaniske og elektriske komponenter*
- Eltransmission ( evt. et selvstændigt projekt)*
- Installation og vedligehold.*

## Forslag til fortsat arbejde

I afsnittet kan anføres de forhold, som skal afklares for at videreudvikle og optimere bølgekraft konceptet. Der kan være tale om forhold, der kan forbedre



energiabsorptionen og/eller forhold, der kan reducere de forventede omkostninger forbundet med at bygge bølgekraftmaskinen.

Endelig kan forhold af miljø og samfundsmæssig betydning anføres. Det kan være betragtninger om sparet CO<sub>2</sub> og muligheder for beskæftigelse og eksport.

# Appendiks A.

## Beregning af energiproduktion

### Referencefordelingen af søtilstande $H_s$

Det er vigtigt, at grundlaget for energiproduktionsberegningerne fremgår klart. Man kan f.eks. benytte en "referencefordeling" af søtilstande f.eks.  $H_s \pm 0,5\text{m}$  samlet over alle retninger, beskrevet ved en Weibull fordeling med parametrene  $b$  og  $k$ .

Hypigheden  $P_i$  af søtilstande  $H_s \pm 0,5\text{m}$  kan beregnes ved brug af formel (28) i kapitel 2. Den anvendte bølgefording kan angives f.eks. som Tabel a.1.

$H_s$ [m]	<0.5	1	2	3	4	5	>5.5
$P_i$ %	11	38	27	14	6	2	1
Timer pr. År	964	3328	2365	1226	525	175	87

Tabel a.1 Langtidsfordeling af  $H_s$  med Weibullfordelingsparametre  $k=1,9$  og  $b=1,5\text{m}$

Hvis den undersøgte bølgekraftmaskine er følsom for bølgeperioderne, kan man vælge at udføre en mere omfattende beregning, med udgangspunkt i et skatterdiagram, som vist i Tabel 2.2 kapitel 2, med henvisning til en udvalgt position, som beskrevet f.eks. i Kortlægning af Bølgeenergiforhold i den danske del af Nordsøen [3].

### Middel bølgekraftpotentiale

Til den pågældende fordeling af søtilstande svarer et bølgekraftpotentiale, traditionelt defineret som: den effekt, en absorber med en diameter på én meter, og med 100% udnyttelsesgrad fra alle retninger i middel på årsbasis, omformer.

Bølgekraftpotentialet pr. meter bølgefront kan beregnes alene ud fra  $H_s$  ved brug af formel (27) kapitel 2. Vægtet med sandsynligheden for de enkelte søtilstande beregnes en årlig middelværdi. Med den valgte referencefordeling er det årlige middelbølgekraftpotentiale  $P_{\text{inf}} \cong 15 \text{ kW/m}$ .

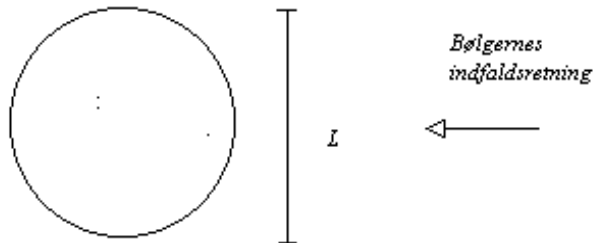
$H_s$ [m]	<0.5	1	2	3	4	5	>5.5	Middel
$P_i$ [%]		38	27	14	6	2	1	
$P_{\text{inf}}$ [kW/m]	-	2,1	11,6	32,0	65,6	114,6	180,8	15

Tabel a.2 Beregning af middel bølgeenergi potentialet med den valgte referencefordeling.

## Data for en bølgemaskine

### Bølgekraftmaskinens udstrækning

Bølgekraftmaskinens karakteristiske længde  $L$  defineres (f.eks. flyderens diameter, bredden af "høvlen" eller afstanden mellem fangarme), og den angivne længde vises på en tegning.



Figur a.1 Skitse af bølgemaskinens karakteristiske dimension.

### Årlig middel rådighedseffekt for en bølgekraftmaskine

Den årlige middelbølgeenergi, som passerer over strækning  $L$ , beregnes i første omgang, som om alle bølger kom fra samme retning, ved at multiplicere det årlige middelbølgekraftpotentiale  $P_{\text{inf}}$  med  $L$ . Med  $L = 10\text{m}$  er den årlige middelrådighedseffekt ca. 150 kW. Hensyntagen til retningsvariation kræver yderligere undersøgelser og beskrives i det efterfølgende afsnit om et stort kraftværk.

### Absorberet effekt (årlig middel)

Den eksperimentelt målte hydrauliske eller pneumatiske effekt, som bølgeenergimaskinen i middel absorberer i de enkelte søtilstande, kan f.eks. angives som vist i Tabel a.3. Detaljer vedr. målinger og optimering af effekt i de enkelte søtilstande kan anføres i projektrapportens Appendiks.

$H_s$ [m]	<0.5	1	2	3	4	5	>5.5
$P_{\text{abs}}$ [kW]		13	37	68	104	120	120

Tabel a.3 Bølgemaskinens middeleffektabsorption med diameter 10m.

Vægtet med sandsynligheden, hvormed de enkelte søtilstande forekommer (Tabel 8.2), beregnes den årlige middelværdi til 33 kW.

Den målte effektabsorptionen som funktion af søtilstanden kan optegnes, som vist på Figur 4.1 i Kapitel 4.

### Indfangningseffektivitet, $\eta_1$

For hver søtilstand beregnes systemets indfangningseffektivitet  $\eta_1$ , et mål for hvor stor en del af den energi, der passerer strækningen  $L$ , bølgemaskinen absorberer. Vægtet med sandsynligheden for de enkelte søtilstande beregnes en årlig middelværdi.

$H_s$ [m]	<0.5	1	2	3	4	5	>5.5	Middel
$P_i$ [%]		38	27	14	6	2	1	
$P_{inf}$ [kW/m]*10m	-	21	116	320	656	1146	1808	155
$P_{abs}$ [kW]		13	37	68	104	120	120	33
$\eta_1$		0.63	0.32	0.21	0.16	0.10	0.07	0.21

Tabel a.4 Bølgemaskinens middeleffektabsorption med diameter 10m.

### Mekanisk virkningsgrad, $\eta_2$

Den mekaniske virkningsgrad  $\eta_2$  beskriver, hvor stor en del af den absorberede effekt, der bliver tilført turbinen. Den hydrauliske effekt er oftest mindre end den absorberede effekt på grund af tab, f.eks. friktionstab, tilbageløbtab m.m. Tabene kan bestemmes ved forsøg eller beregnes i de enkelte søtilstande. På basis af søtilstandenes fordeling beregnes en årsmiddelværdi for den mekaniske virkningsgrad, som vist i Tabel a.5.

$H_s$ [m]	<0.5	1	2	3	4	5	>5.5	Middel
$P_{abs}$ [kW]		13	37	68	104	120	120	33
$P_{tab}$ [kW]		2,2	3,6	5	6	7	7	
Effekt til Turbine [kW]		10,8	33,2	62,7	98,3	113,2	113,2	30,2
$\eta_2$		0,82	0,90	0,93	0,94	0,94	0,94	0,91

Tabel a.5 Beregning af den mekaniske virkningsgrad

### Virkningsgrad for turbine og generator, $\eta_3$

Den samlede virkningsgrad  $\eta_3$  for turbine og generator beskriver den del af den hydrauliske eller pneumatiske effekt, som omsættes til elektrisk energi. Virkningsgraden vil afhænge af tryk- og strømningsforhold, samt af hvor stor en del af designkapaciteten der udnyttes.

En bølgekraftmaskine vil typisk producere en effekt, der stiger med voksende signifikant bølgehøjde, og dermed ofte kun udnytte en lille del af generatorens kapacitet i de mindre og mest hyppige bølgeforhold. Tryk- og strømningsforhold vil også variere, og middelvirkningsgraden for turbine og generator  $\eta_3$  beregnes derfor i de enkelte søtilstande  $H_s$  og vægtes med hyppigheden for de enkelte søtilstande til en årsmiddelværdi.

$H_s$ [m]	<0.5	1	2	3	4	5	>5.5	Middel
Effekt til Turbine [kW]		10,8	33,2	62,7	98,3	113,2	113,2	30,2
Turbinevirkningsgrad $\eta_3$		0	0,66	0,76	0,80	0,80	0,80	0,64
Genereret effekt [kW]		0	21,9	47,6	78,6	90,4	90,4	19,2

Tabel a.6 Beregning af genereret elektrisk effekt i de enkelte søtilstande.

### Årligt produceret energi

De beregnede værdier for elproduktion i de enkelte søtilstande omregnes til middelenenergiproduktion pr. år ved at multiplicere med antallet af timer, de enkelte søtilstande fremhæver.

$H_s$ [m]	<0.5	1	2	3	4	5	>5.5	I alt
Genereret effekt [kW]		0	21,9	47,6	78,6	90,4	90,4	
Timer pr. år	964	3328	2365	1226	525	175	87	8760
Energi [kWh] / år		0	51793	58357	41265	15820	7864	175099

Tabel a.76 Beregning af årligt produceret elektrisk energi.

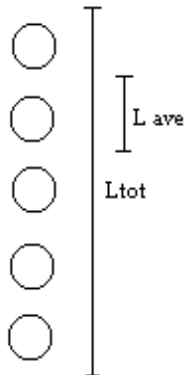
### Data for et stort kraftværk

#### Antal bølgemaskiner

Til opbygning af et stort kraftværk på eksempelvis 370 MW, beregnes antallet af bølgemaskiner på basis af de enkelte bølgemaskinrs installerede effekt. Da der typisk vil kunne forekomme en kortvarig overbelastning af de enkelte generatorer, anføres generatorens mærkeeffekt og den overbelastning, som kan forekomme.

#### Anlagt strækning og middelfast

På basis af bølgemaskinernes indbyrdes placering og udlægningsmønster beregnes den samlede udstrækning af anlægget. Middelfasten beregnes ved at dividere den anlagte strækning med antallet af bølgemaskiner. Der anføres en skitse over det valgte udlægningsmønster.



Figur a.3 Udlægningsmønster for bølgemaskiner

## Årlig rådighedsenergi

Den årlige rådighedsenergi for kraftværket defineres som bølgekraftpotentialet på den pågældende lokalitet (15 kW/m) gange længden af kraftværket (52857 m) gange antallet af timer på et år ( $365 \cdot 24 = 8760$  timer). Med de anførte tal er den årlige rådighedsenergi (6945 mio. kWh).

## Retningsfaktor for bølgemaskiner i klynger

Retningsfaktoren angiver forholdet mellem energiproduktionen beregnet under hensyntagen til retningsvariationer for bølgemaskiner i klynger og energiproduktionen beregnet, som om alle bølgemaskiner var fritstående, og alle bølger kom fra samme hovedretning (Tabel 8.5).

For at bestemme retningsfaktoren for et stort anlæg bestående af grupper af bølgeenergimaskiner må der udføres forsøg, som belyser energiproduktionens følsomhed for bølger af forskellig middelindfaldsretning, og som belyser betydningen af interferens mellem de enkelte bølgemaskiner og evt. skyggevirksomhed.

Årsproduktionen under hensyntagen til retningsvariationer indebærer de samme forsøg og beregninger som for en enkelt maskine, men forsøgsopstillingen må omfatte flere modeller placeret i det aktuelle udlægningsmønster, som vist på Figur 8.2.

Sådanne målinger kombineret med fordelingen af søtilstande fra de enkelte retninger gør det muligt at beregne anlæggets årlige energiproduktion under hensyntagen til retningsvariation.

Hvis der er tale om en aksesymmetrisk geometri (og funktion), kunne forsøg med indfaldsretninger  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  og  $90^\circ$  i forhold til symmetriaksen anbefales. For at beregne den årlige energiproduktion kræves yderligere kendskab til fordelingen af søtilstande inden for de enkelte sektorer, og Tabel a.8 viser antallet af timer pr. År, bølgerne på den pågældende lokalitet kommer fra den pågældende retning. Retningsfordelingen for udvalgte punkter i Nordsøen er bestemt i [3], og fordelingen på en udvalgt position nær Horns rev, vist i nedenstående Tabel a.8.

Hs/Ret	N	NØ	Ø	SØ	S	SV	V	NV	SUM	Pct
7	0	0	0	0	0	2	3	0	6	0,1
6	0	2	0	0	1	8	14	3	28	0,3
5	0	1	4	1	6	37	45	22	115	1,3
4	3	7	25	18	16	106	119	68	362	4,1
3	16	33	52	64	44	201	238	189	836	9,5
2	66	72	133	132	145	399	455	476	1879	21,4
1	335	215	323	297	325	729	789	1158	4173	47,6

<,5	188	93	118	121	91	181	209	367	1367	15,6
<b>sum</b>	609	423	655	633	628	1662	1872	2284	8766	100
<b>Pct</b>	7	4,8	7,5	7,2	7,2	19	21,4	26,1	100	

Tabel a.8 Retningsfordeling af søtilstande ("position 2" ved Horns rev[3])

#### Transmissionsvirkningsgrad, $\eta_4$

Den del af elektriciteten som bølgemaskinernes generatorer producerer, og som føres ind i nettet, udtrykkes som en transmissionsvirkningsgrad  $\eta_4$ .

Virkningsgraden vil afhænge af bl.a. effektniveau og opbygningen og udstrækningen af transmissionssystemet. For transmissionssystemet foreslås derfor, at virkningsgraden beregnes for 4 energiproduktionsniveauer: 0.25, 0.5, 0.75 og 1.0 (fuldlast =1.0).

På basis af søtilstandenes fordeling kan energiproduktionshyppigheder beregnes og dermed en årsmiddelværdi, .som vist i Tabel a.9.

Effektproduktions niveau	MW	H <sub>s</sub> [m]	%	$\eta_1$
0-25%	75	0-2 2	0 71	0 97
25% -50%	150	2 2-3 2	0 18	0 95
50% - 75%	225	3 2-5 0	0 10	0 92
75% - 100%	300	5 0-	0 01	0 90
Middel transmissionsvirkningsgrad				0 96

Tabel a.9 Transmissionstab anslået for eltransmissionens system

#### Rådighedsfaktor

Den tid, anlægget er i drift og fejlfrit kan producere energi, udtrykkes i en rådighedsfaktor.

#### Årligt produceret energi

På basis af de ovenfor anførte værdier beregnes den årligt producerede elektriske energi.

# Appendiks B.

## Overlevelses og designforhold

### Placering i Nordsøen

Den optimale placering af bølgemaskiner i den danske del af Nordsøen kan fastlægges ud fra økonomiske betragtninger vedr. omkostninger og energiproduktion.

Designbølgeforhold og årlig fordeling af bølger er fastlagt på udvalgte positioner, på forskellige vanddybder og med forskellige afstande til kysten i "Kortlægning af bølgeenergiformid i den danske del af Nordsøen" [3], hvor der tilvejebringes et konsistent datamateriale, som belyser både designbølgeforholdene og de normale bølgeforhold.

### Vanddybde og vandstandsvariationer

Vanddybder i den danske del af Nordsøen varierer fra ca. 30 meter i en afstand af 50 km fra kysten til 50 meter i en afstand af ca. 200 km fra kysten.

### Overlevelsesorsøg / designbølger

De søtilstande, der skal udføres forsøg i for at bestemme kræfter og bevægelser i overlevelsestilstanden er beskrevet i kapitel 3. På basis af forsøg kan man fastlægge kræfter og bevægelser på kritiske dele af konstruktionen.

### Konstruktionsdata for bølgemaskinens elementer

Der anføres et skema med de relevante komponenter, som bølgemaskinen indeholder. På skemaet kan anføres reference, design nr. samt karakteristiske dimensioner, stivheder, masser, og hydrostatiske data, som har betydning for resultater.

Reference nr.	Model 1:62,5	Fuld skala
Flyderdiameter	0,16m	10m
Flyderhøjde	0,04m	2,6m
Tovlængde	,58m	36,5m
Tovstivhed	0,512 kN/m	2000 kN/m
Dysediameter	12mm	750mm
osv.		

Tabel b.1 Karakteristiske dimensioner og data i model og fuld skala.

Relevante konstruktionstegninger vedlægges.

### Forankringssystem

I forbindelse med måling af designbelastninger i forankringssystemer til bølgemaskiner er det vigtigt, at forankringssystemets dimensioner og stivhed modelleres korrekt.



Et meget fleksibelt ankersystem vil give mindre kræfter, men til gengæld tillades bølgemaskinen at bevæge sig mere. Et fleksibelt ankersystem vil optage mere "plads", og bevægelserne stille større krav til elkabelforbindelsen fra bølgemaskinen til havbunden.

Forankringskræfter m.m. kan være følsomme for vandstandsvariationer, som bør undersøges.

Systemet bør undersøges for overlevelse med én ankerline ude af funktion.

### **Udmattelse og levetidsberegninger**

Som et konservativt skøn over levetiden af de enkelte konstruktionsdele kræves kendskab til spændinger, kræfter, slaglængder og antal påvirkninger.

Det anbefales, at den maksimale last målt i hver søtilstand lægges til grund for levetidsberegningen. Med udgangspunkt i de definerede søtilstande og middelperioder beregnes antallet af påvirkninger inden for hvert interval pr. år. Med den pågældende dimension og med kendskab til materialets udmattelseskurve kan komponentens levetid beregnes.

### **Resultater af forsøg**

De belastninger, som måles ved modelforsøg i en given skala jf. tegning og resultater, præsenteres i fuld skala værdier.

Typiske forhold, som har betydning for dimensionering af bølgemaskiner, er fastlæggelse af de kræfter, tryk og bevægelser, der optræder i konstruktionen, i energiomformnings- og forankringssystem, samt i designsituationen.

### **Konklusioner**

På baggrund af de udførte forsøg anføres, hvorledes de målte kræfter optages i konstruktionen, og om de i givet fald giver anledning til konstruktive ændringer.

# Litteratur liste

- [1] J. N. Newman, :  
*Marine Hydrodynamics*  
The MIT, press 1977  
(ISBN 0-262-14026-8)
- [2] Danish Wave Power Aps.  
*Hanstholm fase 2B, Offshore wave energy test 1994 –1996*  
November 1996
- [3] *Bølgeenergiforhold i den danske del af Nordsøen*  
RAMBØLL 1999 (under udarbejdelse)
- [4] Peter Frigaard & Jens Peter Kofoed  
*Odin*  
Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning, Aalborg Universitet  
Juni 1998
- [5] Jens Peter Kofoed & Anders Nielsen, :  
*The Wave Dragon*  
Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning, Aalborg Universitet  
1997
- [6] Budal, K., Falnes, J., Hals, T., Iversen, L.C. and Onshus, T.:  
*"Model experiment with a phase controlled point absorber"*.  
Proceedings of Second International Symposium on Wave and Tidal Energy, Cambridge,  
UK, 23-25, September 1981, pp 191-206, 1981. BHRA Fluid Engineering. Cranford,  
Bedford, UK.  
(ISBN 0-906085-43-9).
- [7] Budal, K., Falnes, J., Iversen, L.C., Lillebekken, P.M., Oltedal, G., Hals, T., Onshus,  
T. and Høy, A.S.:  
*"The Norwegian wave-power buoy project"*.  
Proc. Second Inter-national Symposium on Wave Energy Utilization (H. Berge, ed), pp  
323-344, 1982. Tapir, Trondheim, Norway.  
(ISBN 82-519-0478-1)
- [8] Hals, T.:  
*"Modellforsøk i skala 1:10 av bølgekraftbøye type M2"*.  
OTTER-rapport STF88-F82059, marts 1983.
- [9] Iversen, L.C. og Lillebekken, P.M.:  
*"Model tests of a scale 1:10 phase-controlled wave-power buoy of type N2 in the sea"*.  
Technical report. Institutt for eksperimentalfysikk, NTH, January 1983.
- [10] Iversen, L.C. og Lillebekken, P.M.:  
*"Modellforsøk med N2-bøyen i Trondheimsfjorden våren 1983"*.  
Rapport. Institutt for eksperimentalfysikk, NTH, juni 1983.
- [11] Sarmiento A.J.N. and Brito e Melo A.:  
*"An experiment-based time domain model of OWC power plants"*.  
Int. J. Offshore and Polar Engng., Vol. 6, No. 3, pp. 227-233, 1996.

- [12] Sarmento A.J.N.A.:  
*"Model tests optimisation of an OWC wave power plant"*.  
 Int. J. Offshore and Polar Engng., vol.3, No. 1, March 1993, pp. 66-72
- [13] Sarmento, A.J.N.A.:  
*"Wave Flume Experiments on Two-Dimensional Oscillating-Water-Column Wave-Energy Devices"*.  
 Experiments in Fluids, vol. 12, pp. 286-292, 1992.
- [14] Holmes B., Hurley J., Lewis T., Sarmento A.J.N.A., Brito-Melo A. and Falcão A.F. de O.:  
*"1:25 Scale Testing of the Azores Power Plant"*.  
 Proc. 2nd European Wave Power Conf., 8-10 November, Lisbon, pp. 148-155, 1995.
- [15] Sarmento A.J.N.A. and Jacob, J. M. Q. B.:  
*"Model Studies for a Demonstration Wave Power Plant"*.  
 Int. Symp. on Offshore and Polar Engineering (ISOPE91), Int. Soc. for Offshore and Polar Eng., Edinburgh, R. U., pp. 335-339, 1991.
- [16] Yu Z., et al.:  
*"Site Test of a 20kW Wave Power Station at Dawanshan Island"*.  
 OMAE97 Vol.1-B, Yokohama, Japan, pp.97-104.
- [17] Jiang N.:  
*"The Measurement and Control System of Experimental Wave Power Station at Pearl River Estuary"*.  
 Ocean Technology, Vol.11, No.1, 1992, pp.28-37 (in Chinese)